



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

---

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

# **Trabajo final de grado:**

**Estudio mecánico de un componente de  
automoción utilizando herramientas de  
simulación numérica**

**EMSN.001**

---

## **ANEXOS**

**Estudiante:** Víctor Cortés Abad.

**Director:** Rafael Weyler.

**Co-director:** José Antonio Ortiz Marzo.

**Grado:** GRETl.

**Fecha de entrega:** Junio 2016.

## I. Índice de contenido

<b>ANEXO I.....</b>	<b>9</b>
AI - 1. Introducción.....	10
AI - 2. Evaluación preliminar de Samcef.....	10
AI - 3. Método de validación .....	11
AI - 4. Resultados de los casos de validación .....	12
AI - 4.1. BT1 - Viga plana en flexión pura .....	12
AI - 4.2. BN1 - Lámina elíptica - NAFEMS LE1 .....	14
AI - 4.3. BN2 - Lámina cilíndrica - NAFEMS LE2 .....	18
AI - 4.4. BN3 - Lámina semiesférica - NAFEMS LE3 .....	23
AI - 4.5. BN4 - Ménsula de con sección en Z - NAFEMS LE5 .....	26
AI - 4.6. BN5 - Lámina sesgada – NAFEMS LE6 .....	29
AI - 4.7. BN6 - Presión en placa gruesa - NAFEMS LE10 .....	33
AI - 5. Evaluación final de Samcef .....	37
<b>ANEXO II .....</b>	<b>39</b>
AII - 1. Introducción.....	40
AII - 2. Hipótesis.....	40
AII - 3. Geometría y diseño CAD .....	46
AII - 4. Mallado .....	47
AII - 5. Cargas.....	49
AII - 5.1. Caso 1 .....	49
AII - 5.1.1. Presión .....	49
AII - 5.1.2. Fricción cojinetes .....	49
AII - 5.1.3. Fricción émbolo .....	50
AII - 5.1.4. Fuerza inercial alternativa .....	51
AII - 5.2. Caso 2 .....	51
AII - 5.2.1. Presión .....	51
AII - 5.2.2. Fricción cojinetes .....	51
AII - 5.2.3. Fricción émbolo .....	52

AII - 5.2.4. Fuerza inercial alternativa .....	52
AII - 5.3. Caso 3 .....	53
AII - 5.3.1. Presión .....	53
AII - 5.3.2. Fricción cojinetes .....	54
AII - 5.3.3. Fricción émbolo .....	54
AII - 5.3.4. Fuerza inercial alternativa .....	54
AII - 6. Restricciones .....	55
AII - 7. Resultados.....	57
AII - 7.1. Predicción.....	57
AII - 7.2. Caso 1 – PMS.....	58
AII - 7.3. Caso 2 – PMI.....	61
AII - 7.4. Caso 3 – $\theta=21.53^\circ$ .....	64
AII - 8. Conclusión.....	67
<b>ANEXO III.....</b>	<b>73</b>
AIII - 1. Introducción.....	74
AIII - 2. Pre-procesado .....	75
AIII - 3. Cálculo.....	88
AIII - 4. Post-procesado .....	89
<b>BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA .....</b>	<b>91</b>

## I. Índice de ilustraciones

### ANEXO I

Ilustración AI - 4.1: Geometría de viga plana en flexión. ....	12
Ilustración AI - 4.2: Condiciones de contorno BT1. ....	13
Ilustración AI - 4.3: Resultados BT1. ....	13
Ilustración AI - 4.4: Geometría BN1.....	14
Ilustración AI - 4.5: Condiciones de contorno BN1.....	15
Ilustración AI - 4.6: Resultados BN1 - quad. ....	16
Ilustración AI - 4.7: Resultados BN1 - tria.....	17
Ilustración AI - 4.8: Geometría BN2.....	18
Ilustración AI - 4.9: Condiciones de contorno BN2.....	19
Ilustración AI - 4.10: Resultados BN2. ....	20
Ilustración AI - 4.11: Diferencia de direcciones.....	21
Ilustración AI - 4.12: Resultados BN2 con malla fina.....	22
Ilustración AI - 4.13: Geometría BN3.....	23
Ilustración AI - 4.14: Condiciones de contorno BN3. ....	24
Ilustración AI - 4.15: Resultados BN3 - linear quad.....	25
Ilustración AI - 4.16: Resultado BN3 - parabolic quad.....	25
Ilustración AI - 4.17: Geometría BN4.....	26
Ilustración AI - 4.18: Condiciones de contorno BN4. ....	27
Ilustración AI - 4.19: Resultados BN4. ....	28
Ilustración AI - 4.20: Geometría BN5.....	29
Ilustración AI - 4.21: Condiciones de contorno BN5 – malla quad.....	30
Ilustración AI - 4.22: Condiciones de contorno BN5 – malla tria. ....	30
Ilustración AI - 4.23: Resultados BN5 - quad. ....	31

Ilustración AI - 4.24: Resultados BN5 - tria.....	31
Ilustración AI - 4.25 Geometría BN6.....	33
Ilustración AI - 4.26: Condiciones de contorno BN6. ....	34
Ilustración AI - 4.27: Resultados BN6 - brick. ....	35
Ilustración AI - 4.28: Resultados BN6 - wedge. ....	35
Ilustración AI - 4.29: Resultados BN6 - tetra. ....	36

## ANEXO II

Ilustración AII - 2.1: Fuerza de fricción camisa-pistón. Fuente: Casanova y Aguirre. ....	43
Ilustración AII - 3.1: Diseño CAD de la biela seleccionada. Fuente: <a href="http://www.grabcad.com">www.grabcad.com</a> . ....	46
Ilustración AII - 3.2: Diseño CAD de la biela adaptada. ....	47
Ilustración AII - 4.1: Malla basta inicial.....	48
Ilustración AII - 4.2: Malla afinada.....	48
Ilustración AII - 5.1: Aplicación de $F_p$ en el caso 1. ....	49
Ilustración AII - 5.2: Enlaces RBE en los agujeros de la biela.....	50
Ilustración AII - 5.3: Fuerza de fricción camisa-émbolo en el caso 1. ....	51
Ilustración AII - 5.4: Fuerza de fricción camisa-émbolo en el caso 2. ....	52
Ilustración AII - 5.5: Esquema ilustrativo de la posición del sistema pistón-biela-cigüeñal en el tercer caso. ....	53
Ilustración AII - 5.6: Aplicación de $F_p$ en el caso 3. ....	53
Ilustración AII - 5.7: Fuerza de fricción camisa-émbolo en el caso 3. ....	54
Ilustración AII - 6.1: Sistema de coordenadas alternativo. ....	55
Ilustración AII - 7.1: Puntos de falla comunes. Fuente: CATerpillar.....	57
Ilustración AII - 7.2: Resultados de tensión en el caso 1. ....	58
Ilustración AII - 7.3: Detalle del pie, caso 1, malla fina. ....	59

Ilustración AII - 7.4: Detalle del pie, caso 1, malla fina, escala saturada. ....	60
Ilustración AII - 7.5: Detalle de la cabeza, caso 1, malla fina, escala saturada. ....	60
Ilustración AII - 7.6: Resultados de tensión en el caso 2. ....	61
Ilustración AII - 7.7: Detalle del pie, caso 2, malla fina, escala saturada. ....	62
Ilustración AII - 7.8: Detalle de la cabeza, caso 2, malla fina, escala saturada. ....	63
Ilustración AII - 7.9: Resultados de tensión en el caso 3. ....	64
Ilustración AII - 7.10: Detalle del pie, caso 3, malla fina, escala saturada. ....	65
Ilustración AII - 7.11: Detalle de la cabeza, caso 3, malla fina, escala saturada. ....	66
Ilustración AII - 8.1: Tensión de Von Mises según ángulo girado. Fuente Zhou, Wnag y Ji. ....	69
Ilustración AII - 8.2: Deformación axial en primer y segundo caso. ....	70
Ilustración AII - 8.3: Deformación axial en el tercer caso. ....	71

### ANEXO III

Ilustración AIII - 1.1: Barra de Inicio. ....	74
Ilustración AIII - 1.2: Menú Archivo. ....	75
Ilustración AIII - 2.1: FEM y SIM nuevos. ....	75
Ilustración AIII - 2.2: FEM y SIM nuevos ventana emergente. ....	76
Ilustración AIII - 2.3: Vista del archivo de simulación. ....	76
Ilustración AIII - 2.4: Asignar el material. ....	77
Ilustración AIII - 2.5: Material isotrópico. ....	77
Ilustración AIII - 2.6: Control de malla. ....	78
Ilustración AIII - 2.7: Grupo de Utilidades. ....	78
Ilustración AIII - 2.8: Constructor punto de malla. ....	79
Ilustración AIII - 2.9: Malla 2D. ....	80
Ilustración AIII - 2.10: Edición propiedades recolector de malla. ....	80

Ilustración AIII - 2.11: Edición Recolector de malla, ventana emergente. ....	81
Ilustración AIII - 2.12: Propiedades Cáscara fina. ....	81
Ilustración AIII - 2.13: Creación SISC cilíndrico. ....	82
Ilustración AIII - 2.14: Menú Inicio, Activar la simulación. ....	82
Ilustración AIII - 2.15: Vista del navegador con solución activa. ....	83
Ilustración AIII - 2.16: Añadir restricción. ....	83
Ilustración AIII - 2.17: Aplicación de Restricción definida por el usuario. ....	84
Ilustración AIII - 2.18: Creación subcaso nuevo. ....	85
Ilustración AIII - 2.19: Vista navegador con subcaso activado. ....	85
Ilustración AIII - 2.20: Aplicación de momento. ....	86
Ilustración AIII - 2.21: Aplicación de presión. ....	86
Ilustración AIII - 2.22: Aplicación de la fuerza. ....	87
Ilustración AIII - 2.23: Determinar dirección de la fuerza. ....	87
Ilustración AIII - 3.1: Grupo Solución. ....	88
Ilustración AIII - 3.2: Solución completada. ....	88
Ilustración AIII - 4.1: Aplicación del output deseado. ....	89
Ilustración AIII - 4.2: Ploteo suave. ....	90
Ilustración AIII - 4.3: Anotación nueva. ....	90

## II. Índice de tablas

### ANEXO I

Tabla AI - 4.1: Tabla de resultados BT1. ....	14
Tabla AI - 4.2: Tabla de resultados BN1.....	17
Tabla AI - 4.3: Tabla de resultados BN2.....	20
Tabla AI - 4.4: Tabla de resultados BN3.....	26
Tabla AI - 4.5: Tabla de resultados BN4.....	28
Tabla AI - 4.6: Tabla de resultados BN5.....	32
Tabla AI - 4.7: Tabla de resultados BN6.....	36
Tabla AI - 5.1: Promedio de errores (a excepción de los resultados BN2 – case 2). .....	38

### ANEXO II

Tabla AII - 2.1: Presiones en la cámara de combustión.....	42
Tabla AII - 2.2: Fuerzas de fricción camisa-émbolo en cada caso. ....	44
Tabla AII - 2.3: Valores referencia de parámetros constructivos – 1. ....	45
Tabla AII - 2.4: Valores referencia de parámetros constructivos – 2. ....	45
Tabla AII - 2.5: Masas de elementos móviles. ....	46
Tabla AII - 6.1: Grados de libertad en el pie. ....	55
Tabla AII - 6.2: Grados de libertad en el pie (caso 3).....	56
Tabla AII - 6.3: Grados de libertad en la cabeza. ....	56
Tabla AII - 7.1: Resultados de tensión en el caso 1. ....	58
Tabla AII - 7.2: Resultados de tensión en el caso 2. ....	62
Tabla AII - 7.3: Resultados de tensión en el caso 3. ....	65
Tabla AII - 8.1: Tiempos invertidos en las simulaciones. ....	67
Tabla AII - 8.2: Resultados con malla fina.....	67





**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

---

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

# **Estudio mecánico de un componente de automoción utilizando herramientas de simulación numérica**

**EMSN.001**

---

## **ANEXO I - Validación de *NX Samcef***

## AI - 1. Introducción

El presente documento tiene como objetivo evaluar y validar el *solver Samcef* incluido en Siemens *NX*. Previamente a la validación mediante la resolución de problemas establecidos y a la comparación con los resultados ampliamente aceptados, se realizará una evaluación inicial de las características y puntos fuertes de *Samcef*, así como una breve descripción de qué se espera de dicho *solver*.

Primeramente, debe realizarse un breve estudio de las características y posibilidades del código. Atendiendo al folleto comercial del software (*Siemens 2015*), se detallan cinco módulos diferenciados:

- Análisis lineal
- Análisis no lineal
- Análisis térmico
- Modelado de materiales compuestos
- Paquetes orientados a la aplicación

Dada la naturaleza del presente proyecto y atendiendo a las especificaciones del mismo, solo se evaluará y validará el módulo de análisis lineal. Dicho módulo de cálculo cuenta con beneficios propios, como la posibilidad de generar análisis lineal autónomo o solución complementaria para posterior análisis no lineal, o aplicar cargas termo-mecánicas. Asimismo, permite realizar cálculos tanto con estructuras metálicas como con compuestas. También cuenta con múltiples aspectos físicos como interacción fluido-estructura o piezo-electricidad y posee la ventaja de utilizar *solvers* en paralelo para un cálculo más rápido.

## AI - 2. Evaluación preliminar de Samcef

Tal y como queda expuesto en la justificación del proyecto, parte de este está enfocada a validar el *solver NX Samcef*. El principal propósito de la misma es valorar la viabilidad de la incorporación y uso de *NX Samcef* en las empresas del grupo *Análisis y Simulación (AyS)*. La vertiente de desarrollo de productos y procesos (*P&PD*) abarca el uso de un amplio programario de simulación, ya sea de elementos o volúmenes finitos. Actualmente se trabaja con *MSC Nastran*, *NX Nastran*, *Marc*, *Moldex 3D* o *Quickcast*, entre otros.

En la actualidad, los cálculos dinámicos o lineales estáticos se realizan con las variantes de *Nastran*, tanto la producida por *MSC* como la que comercializa *Siemens*. Según el director técnico de la oficina de Sabadell, Roger Fabra, ambas interfaces son relativamente sencillas de utilizar, con comandos intuitivos y posibilidades de resolver sin necesidad de excesiva preparación.

Por el contrario, cuando es requerido un cálculo no lineal se utiliza el *solver Marc*, con el post y pre procesado con *Mentat*. Según el señor Fabra, dicho programa es muy complejo puesto que tiene infinidad de parámetros que pueden ser modificados. Este hecho supone una ventaja en cuanto a precisión de cálculo, pero implica un consumo de tiempo muy elevado.

¿Qué se espera de *NX Samcef*? Dada la gran diferencia de tiempo de preparación de los cálculos entre *Marc* y *Nastran*, el grupo AyS pretende encontrar un *solver* que sea un punto intermedio entre ambos. Dicho *solver* se espera que sea *NX Samcef*, del que se espera una buena respuesta y precisión en cálculos no lineales. Eso sí, requiriendo mucho menos tiempo de preparación que *Marc*. Así pues, las conclusiones de este proyecto de validación lineal elástico se espera que sean positivas, y que den luz verde a una validación de casos no lineales.

### AI - 3. Método de validación

El presente estudio contempla casos de validación, también llamados *benchmarks*, para el *solver Samcef*, integrado en el entorno Siemens *NX*. Como se ha expuesto anteriormente, la totalidad de dichos los casos corresponde de problemas elásticos lineales. La solución de referencia para el primer caso, viga plana en flexión pura, es de carácter teórico (BT: benchmark teórico). En cambio los demás casos se contrastan con una solución de carácter ingenieril ampliamente aceptada, calculada por la asociación independiente *National Agency for Finite Element Methods and Standards (NAFEMS)*, designados con el código BN: benchmark de NAFEMS.

Cada caso contiene descripción tanto de los datos e información de geometrías necesarios, como de los elementos y densidades de malla a configurar. Asimismo, se detalla el material, las condiciones de contorno y finalmente, los resultados. Estos últimos son comparados con los resultados *benchmark* y los que retorna *NX Nastran* realizando el mismo caso.

Se considera oportuno también realizar uno de los casos de manera pautada y guiada, por tal de ilustrar el programa *NX*, así como detallar los pasos a seguir. Dicho tutorial se realiza en el caso BN2, puesto que este resulta idóneo para explorar diferentes facetas del *software*.

## AI - 4. Resultados de los casos de validación

### AI - 4.1. BT1 - Viga plana en flexión pura

Caso de solución teórico en el que se debe determinar la máxima tensión, máxima flecha y la energía acumulada en una viga plana cargada con una fuerza de flexión.

#### Esquema y geometría

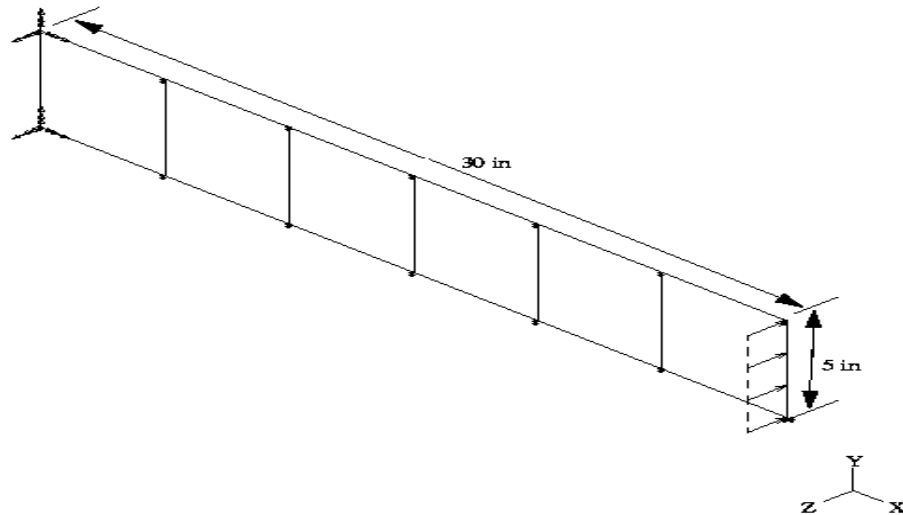


Ilustración AI - 4.1: Geometría de viga plana en flexión.

Unidades: sistema imperial.

**Longitud:** 30 pulgadas.

**Espesor:** 0,1 pulgada.

**Altura:** 5 pulgadas.

**Material: isotrópico**

$E = 30 \cdot 10^6$  psi.

$\nu = 0,03$

#### Mallado

**Mallado mediante elementos lineales 2D:** Mindlin *Shell* [T29] (4).

**Control de malla:** 1x6 elementos (*il. 4.2*).

## Condiciones de contorno

**Restricciones:** un extremo fijo en todos los grados de libertad.

**Cargas:** fuerza de 0,6lb en dirección transversal, aplicada en el extremo libre.

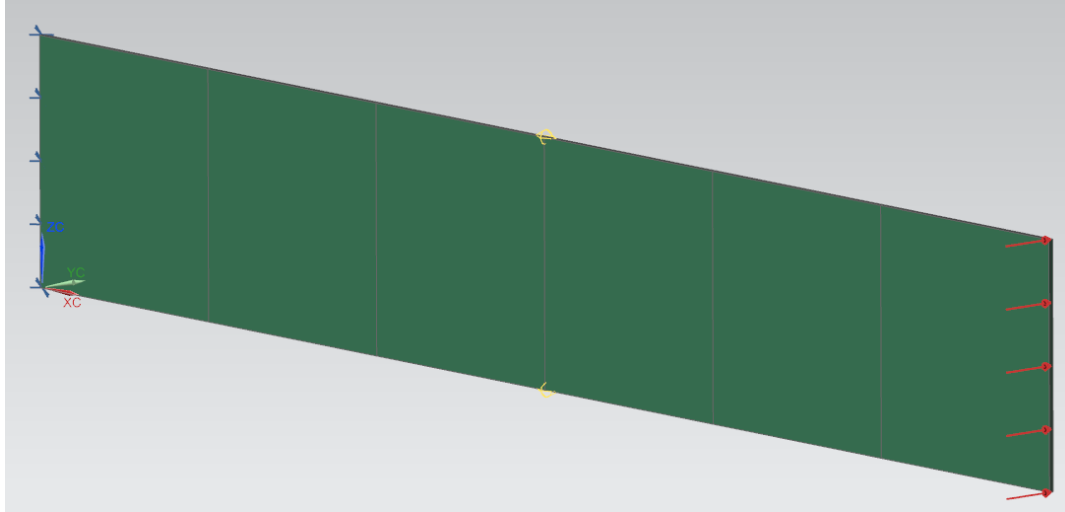


Ilustración AI - 4.2: Condiciones de contorno BT1.

## Resultados

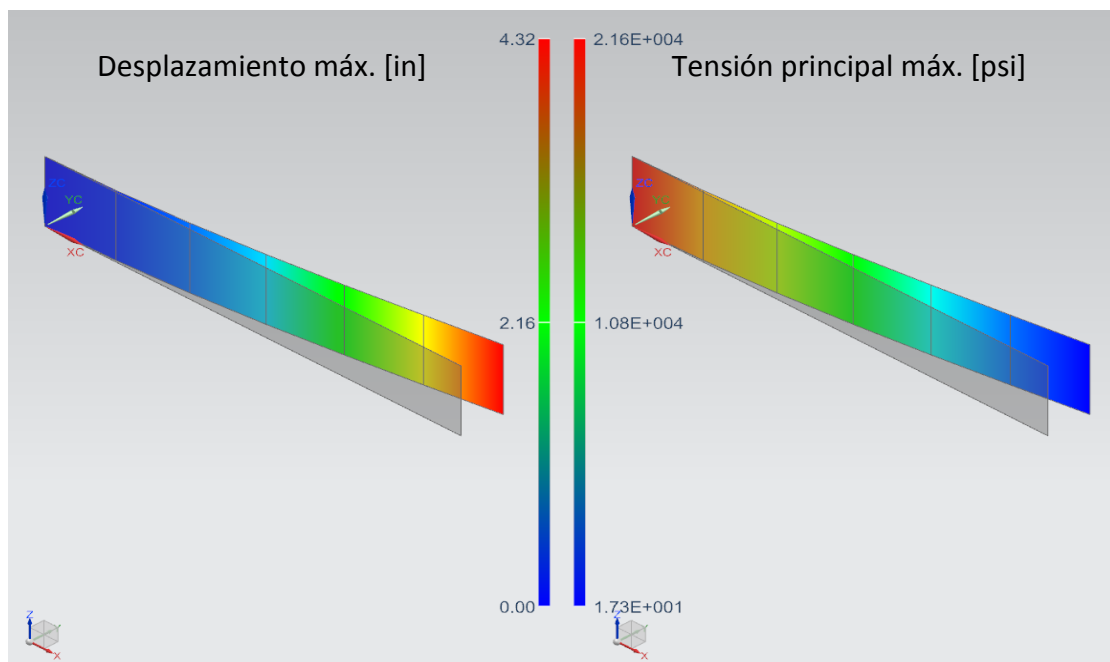


Ilustración AI - 4.3: Resultados BT1.

Una vez simulado el problema con las condiciones descritas, se obtienen los siguientes resultados numéricos y los errores absolutos:

Output	Benchmark	Nastran	Error	Samcef	Error
Desplazamiento máx. [in]	4,320	4,264	0,056	4,319	0,001
Tensión principal máx. [psi]	2,16E+07	1,98E+07	0,083	2,16E+07	0,000

Tabla AI - 4.1: Tabla de resultados BT1.

Como puede apreciarse en la *tabla 4.1*, *Samcef* reproduce mejor los resultados reales del problema BT1, llegando incluso a obtener la tensión principal sin error alguno, aproximando el resultado a tres decimales.

## AI - 4.2. BN1 - Lámina elíptica - NAFEMS LE1

Este test es un análisis elástico lineal de una lámina elíptica, se utilizarán mallas bastas y finas con elementos planos (*shell*). Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE1 (*NAFEMS 1986a*).

### Esquema y geometría

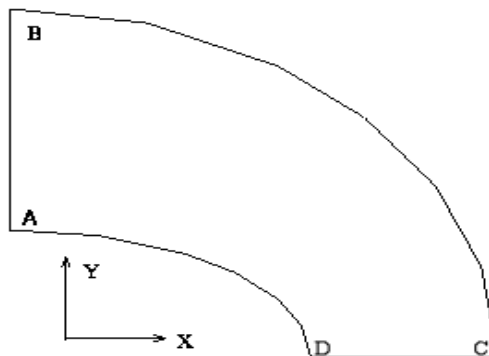


Ilustración AI - 4.4: Geometría BN1.

**Unidades:** sistema internacional.

**Semieje mayor interior:** 2 mm.

**Semieje menor interior:** 1 mm.

**Semieje mayor exterior:** 3,25 mm.

**Semieje menor exterior:** 2,75 mm.

**Espesor:** 0,1 mm.

## Material: isotrópico

$E = 210e3 \text{ MPa}$ .

$\nu = 0,3$

## Mallado

### Mallado mediante elementos 2D:

- Linear quad: Mindlin *Shell* [T29] (4).
- Parabolic quad: Heterosis *Shell* [T156] (8).
- Linear tria: Mindlin *Shell* [T28] (3).
- Parabolic tria: Heterosis *Shell* [T155] (6).

### Dos densidades de mallado:

- Malla basta: control de malla de 3x2 elementos (*il. 4.5*).
- Malla fina: control de malla de 6x4 elementos.

## Condiciones de contorno

### Restricciones:

- Borde AB: desplazamiento en X fijo.
- Borde CD: desplazamiento en Y fijo.

**Cargas:** presión de 10MPa en el borde BC, dirección normal a la curva, en sentido hacia el exterior.

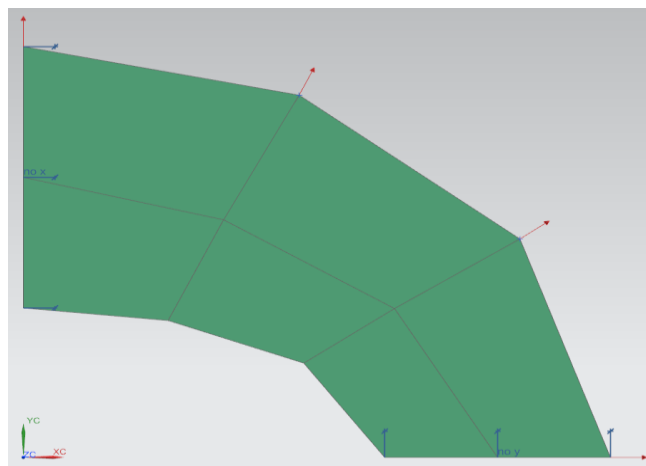


Ilustración AI - 4.5: Condiciones de contorno BN1.

Cabe mencionar que la carga ha sido aplicada individualmente en cada nodo, puesto que el programa de pre procesado (*NX*) no permite la aplicación con facilidad de una carga con dirección variable.

Así pues, debe dividirse la carga total entre el número de elementos, y aplicar el valor resultante a cada nodo interior. Los nodos de los extremos deben recibir solo la mitad de la fuerza aplicada en los nodos interiores.

## Resultados

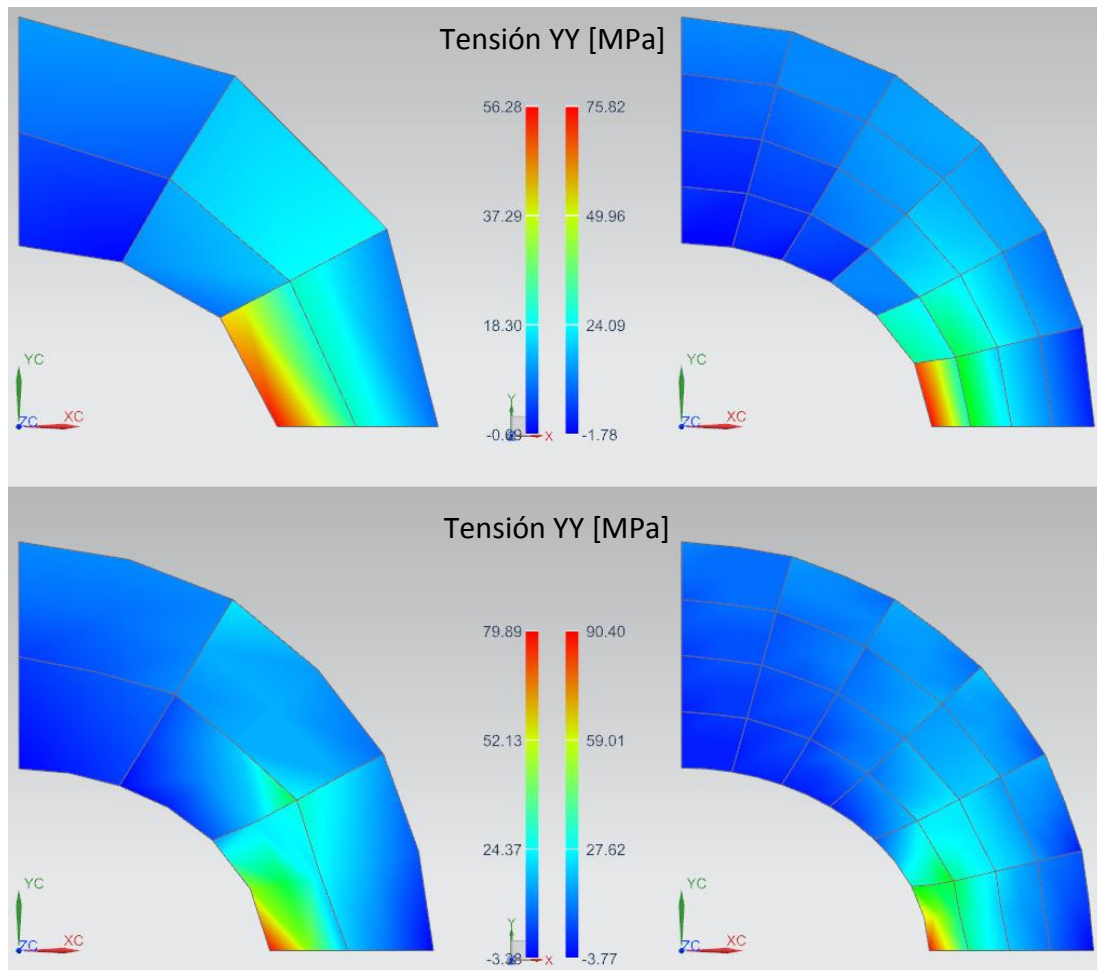


Ilustración AI - 4.6: Resultados BN1 - quad.



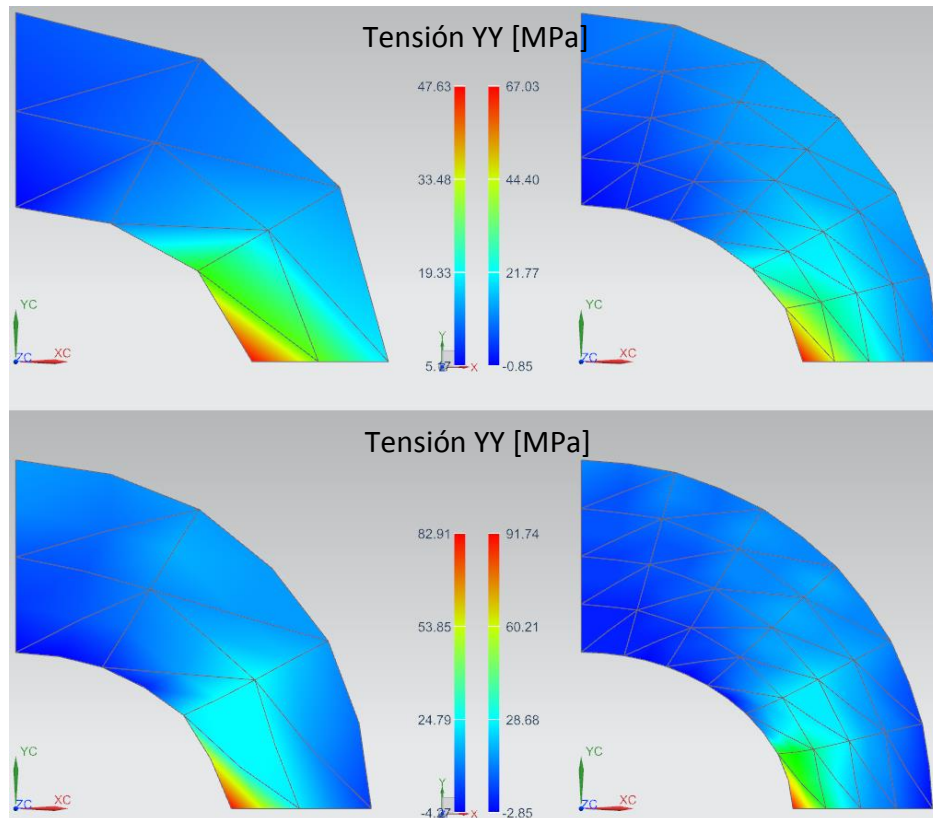


Ilustración AI - 4.7: Resultados BN1 - tria.

**Output: Tensión YY [MPa]  
(dirección AB) en punto D.**

	<b>Benchmark</b>	<b>Nastran</b>	<b>Error</b>	<b>Samcef</b>	<b>Error</b>
Linear quad – malla basta	92,7	62,1	30,6	56,3	36,4
Linear quad – malla fina		79,6	13,1	75,8	16,9
Parabolic quad – malla basta		82,1	10,6	79,9	12,8
Parabolic quad – malla fina		89,9	2,8	90,4	2,3
Linear tria – malla basta		52,9	39,8	47,6	45,1
Linear tria – malla fina		70,8	21,9	67,0	25,7
Parabolic tria – malla basta		76,8	15,9	82,9	9,8
Parabolic tria – malla fina		93,6	0,9	91,7	1,0

Tabla AI - 4.2: Tabla de resultados BN1.

Atendiendo a la *tabla 4.2*, puede apreciarse que las simulaciones con mallas bastas en *Samcef* son menos precisas que las realizadas con *Nastran* para este test. De todas maneras, cabe mencionar que las simulaciones tienden a converger más rápidamente en relación al número de elementos en la malla. Este hecho es particularmente notable en los elementos parabólicos, ya sean *quad* o *tria*.

### AI - 4.3. BN2 - Lámina cilíndrica - NAFEMS LE2

Este test es un análisis elástico lineal de una superficie cilíndrica, se valorarán dos situaciones de carga utilizando elementos planos (*shell*). Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE2 (*NAFEMS 1986b*).

#### Esquema y geometría

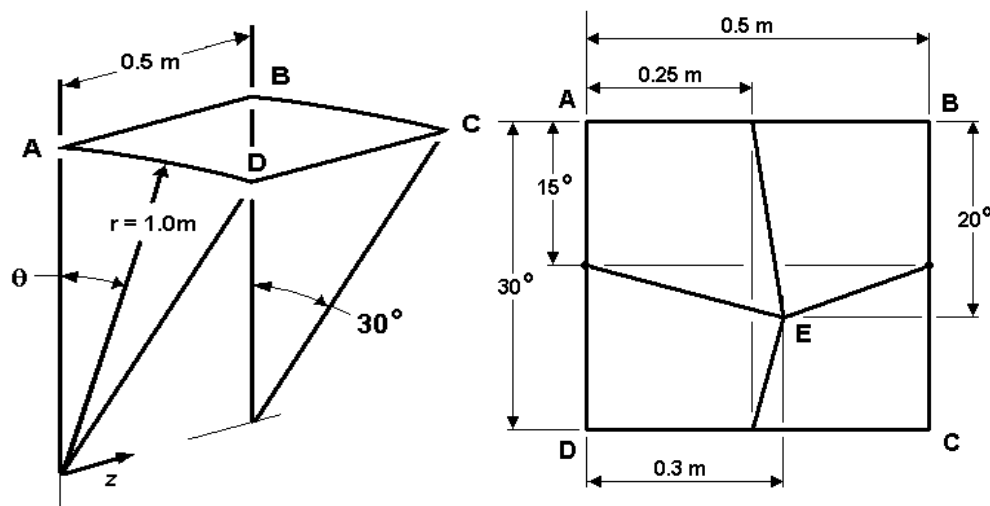


Ilustración AI - 4.8: Geometría BN2.

**Unidades:** sistema internacional.

**Espesor:** 0,01 m.

**Material:** isotrópico

$E = 210 \text{e}3 \text{ MPa}$ .

$\nu = 0,3$

## Mallado

### Mallado mediante elementos 2D:

- Linear quad: Mindlin *Shell* [T29] (4).
- Parabolic quad: Heterosis *Shell* [T156] (8).

### Condiciones de contorno

#### Restricciones:

- Arista AB fija (todos los grados).
- Aristas AD y BC: fijar traslación en dirección axial y rotaciones normal (sistema de coordenadas cilíndrico).

#### Cargas caso 1:

- Momento repartido aplicado en la arista DC, de 1 kNm/m, en dirección axial. Dado que la arista mide 0,5m, se puede aplicar también un momento único de 500 Nm.

#### Cargas caso 2:

- Presión uniforme normal a la superficie ABCD hacia afuera de 0,6 MPa.
- Presión uniforme tangencial a la malla en arista DC de 60 MPa. Como en el caso anterior, aplicar dicha presión mediante la fuerza equivalente:

$$F = P \cdot S = \frac{60N}{mm^2} * 10mm \cdot 500mm = 300 \text{ KN}$$

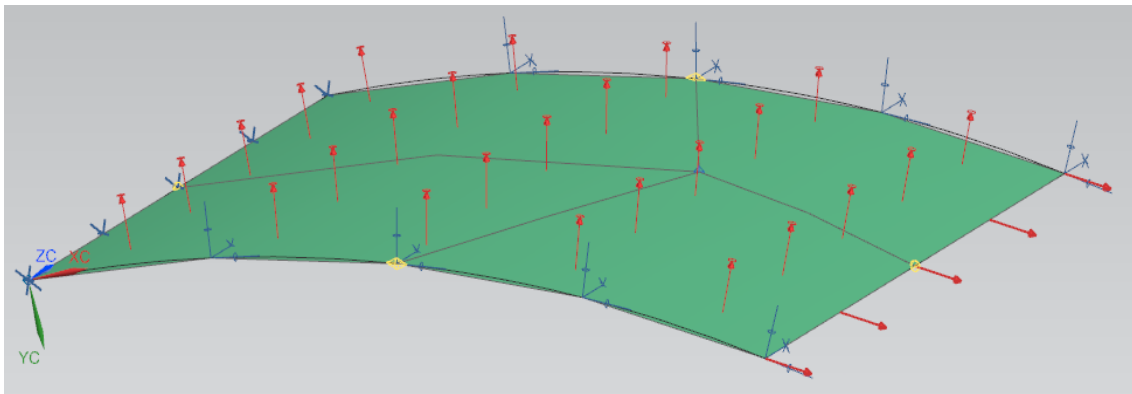


Ilustración AI - 4.9: Condiciones de contorno BN2.

## Resultados

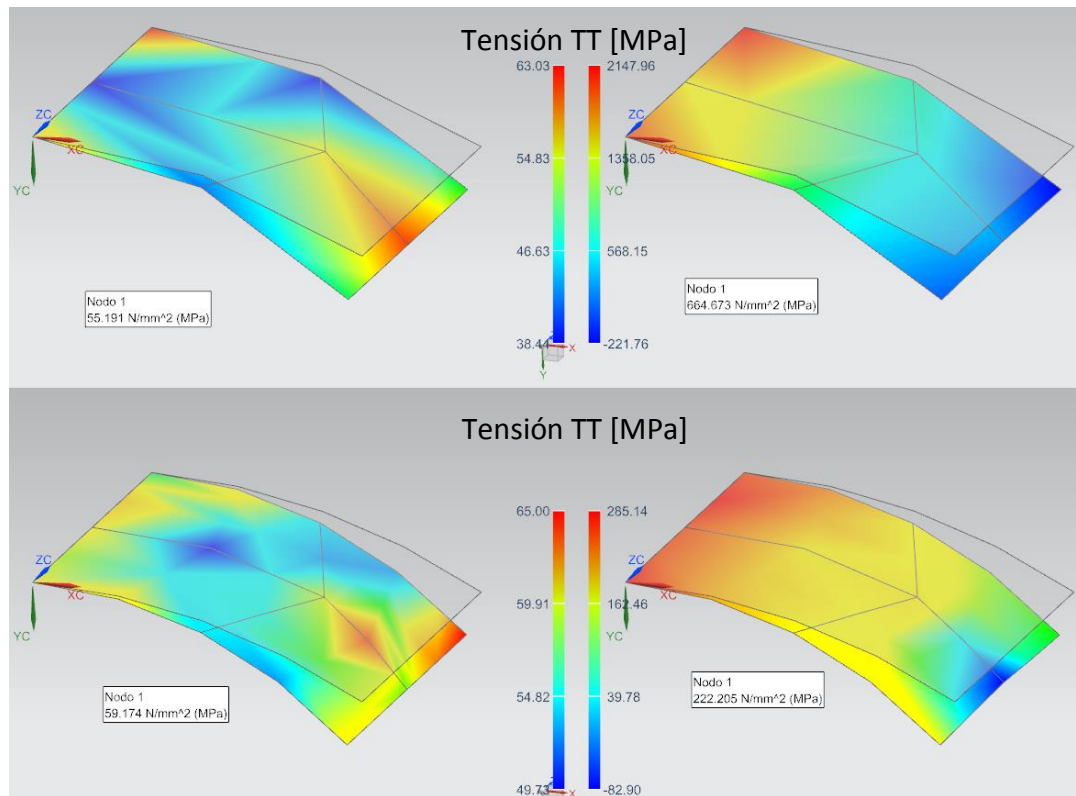


Ilustración AI - 4.10: Resultados BN2.

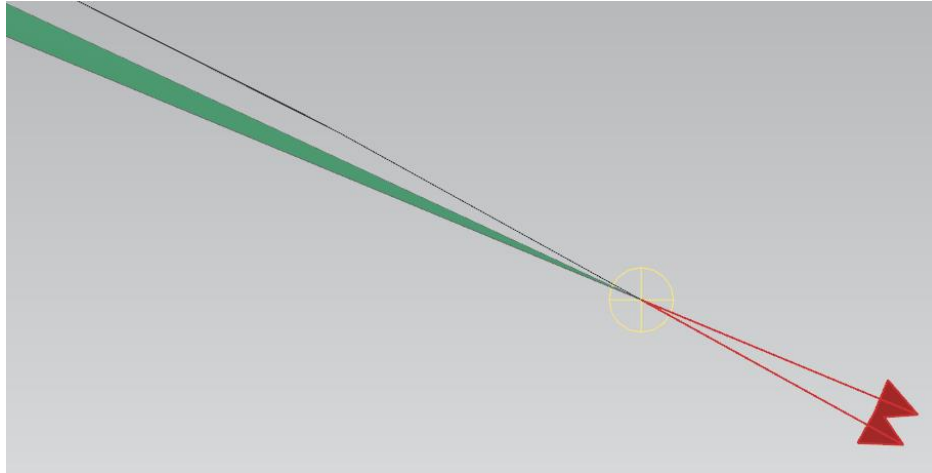
Output: Tensión TT [MPa] en el punto E.

	Benchmark	Nastran	Error	Samcef	Error
Case 1 - Linear quad	60,0	51,8	8,2	55,2	4,8
Case 1 - Parabolic quad		56,4	3,6	59,2	0,8
Case 2 - Linear quad		51,1	8,9	664,7	604,7
Case 2 - Parabolic quad		56,4	3,6	222,2	162,2

Tabla AI - 4.3: Tabla de resultados BN2.

De un modo semejante al apartado anterior, se corrobora con el primer sub-caso que los elementos parabólicos aproximan mejor el resultado. Asimismo, es importante destacar los resultados del segundo sub-caso. Tales soluciones distan mucho del valor benchmark, se procede a explicar los presuntos motivos.

Desde el momento en que se aproxima una malla de elementos cuadriláteros a una curva, se producen discrepancias en las direcciones tangentes (*il. 4.11*). Este hecho está indicado en el enunciado del problema de NAFEMS, donde se especifica que se debe tomar la dirección tangente al elemento, en vez de la tangente a la curva.

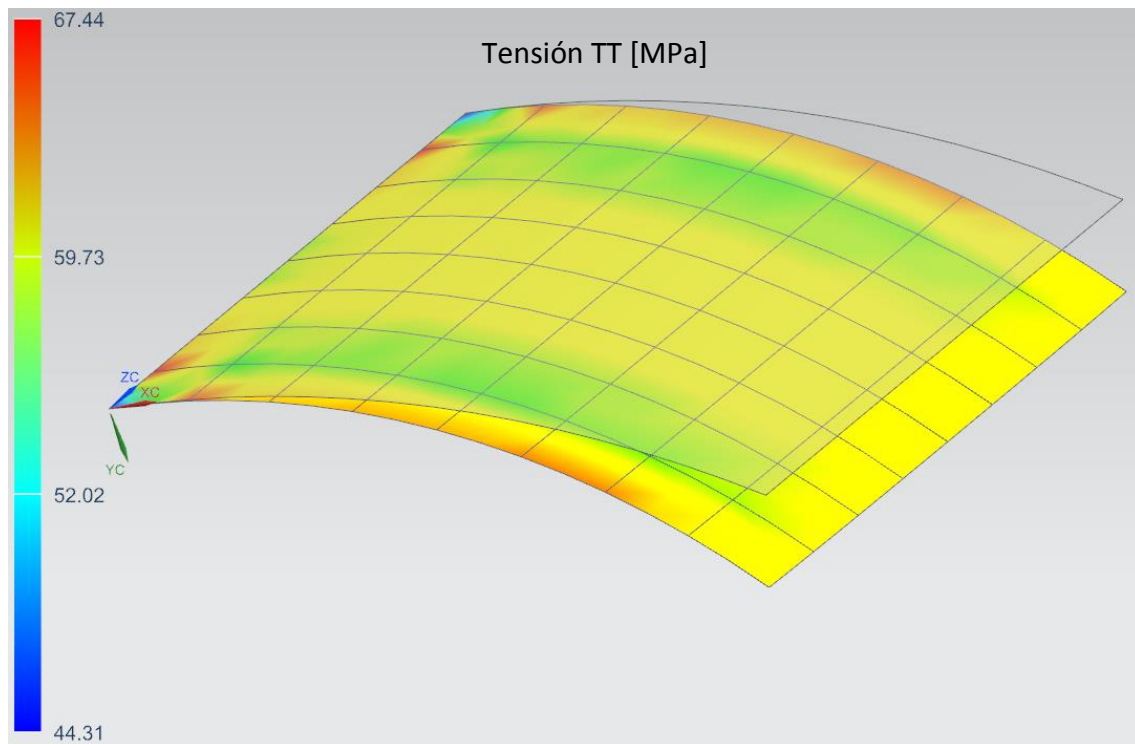


**Ilustración AI - 4.11: Diferencia de direcciones.**

Siguiendo tales instrucciones, se ha aplicado la carga en dirección tangente, a pesar de ello, los resultados no son los esperados. Este hecho puede ser debido a que el programa tiene problemas con la integración de superficies, o bien, debido a no reproducir las condiciones de contorno (carga) con precisión. Siendo el segundo el más probable.

Por tal de acotar la fuente del problema, se procede a reproducir el problema aplicando la carga en la dirección tangencial a la curva. Una vez realizada dicha simulación, se obtiene un resultado de tensión tangencial (en el punto E) de 1.309 MPa. Tal resultado, muy superior al anterior, apunta a que esta simulación es muy sensible a la dirección de aplicación de la carga. Dado que la pequeña diferencia angular entre direcciones (*il. 11*), genera una diferencia entre resultados superior al 100% (de 605 MPa a 1.309 MPa).

El uso de una malla de tan mala calidad es también presunta fuente de error, para poder analizar mejor los resultados, se procede a simular el test con una malla afinada. Como se puede apreciar en la *il. 4.12*, esta simulación devuelve resultados precisos, puesto que en la zona donde se encuentra el punto E, la tensión estaría comprendida entre 52 MPa y 67 MPa (color amarillo-verde).



**Ilustración AI - 4.12: Resultados BN2 con malla fina.**

Cruzando la información obtenida en ambas experiencias, se puede seguir el siguiente razonamiento:

- Las restricciones son correctas, puesto que son comunes para ambos casos, y el primer caso devuelve resultados muy precisos.
- Por lo tanto, ninguna de las direcciones aplicadas a la carga (caso 2) corresponden a las condiciones de contorno del test.
- Además, los resultados son altamente sensibles a la variación de dicha dirección (variación de resultados según direcciones del 100%).
- Asimismo, se verifica que una malla de buena calidad devuelve resultados altamente precisos. Hay que tener en cuenta también que con una malla afinada la dirección tangente a la curva y al elemento son muy similares.
- Por lo tanto, se concluye que el error puede ser producido por dos causas:
  - i) No se han podido reproducir correctamente las condiciones de las cargas expuestas en el enunciado.
  - ii) El programa tiene carencias en la integración de superficies para elementos tan deformados como los del enunciado original.

## AI - 4.4. BN3 - Lámina semiesférica - NAFEMS LE3

Este test es un análisis elástico lineal de una superficie semiesférica, se utilizarán mallas bastas y finas de elementos bidimensionales tipo *shell*. Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE3 (*NAFEMS 1986c*).

### Esquema y geometría

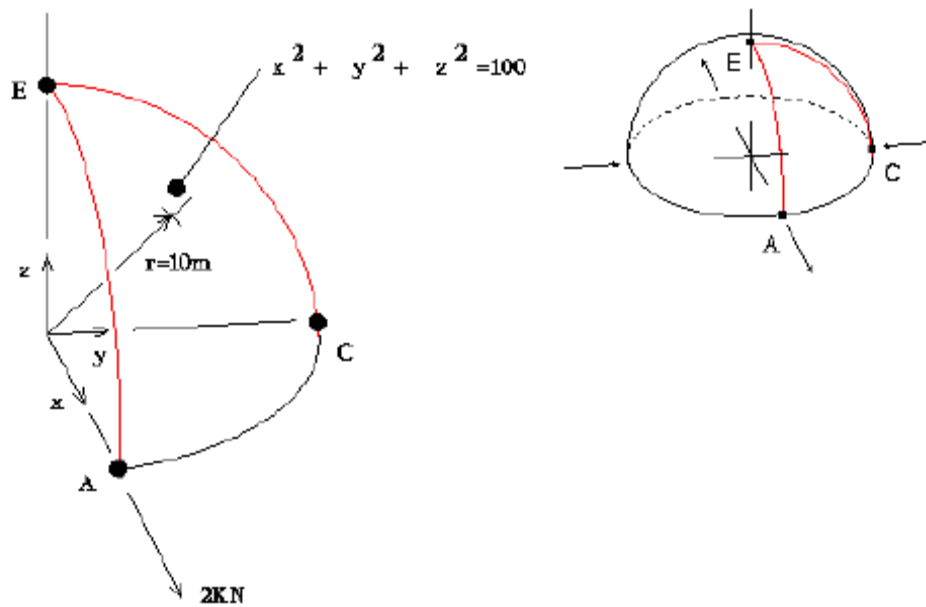


Ilustración AI - 4.13: Geometría BN3.

**Unidades:** sistema internacional.

**Radio:** 10 m.

**Espesor:** 0,04 m.

**Material:** isotrópico

$E = 68.25 \times 10^3 \text{ MPa}$ .

$\nu = 0,3$

## Mallado

### Mallado mediante elementos 2D:

- Linear quad: Mindlin *Shell* [T29] (4).
- Parabolic quad: Heterosis *Shell* [T156] (8).

### Dos densidades de mallado:

- Malla basta: control de malla de 4 elementos por arista (*fig. 4.14*).
- Malla fina: control de malla de 8 elementos por arista.
- Punto G en posición  $X=Y=Z= 10/(3^{1/2})$  m.

## Condiciones de contorno

### Restricciones:

- Arista AE: desplazamiento en Y, giros en X y Z fijos.
- Arista CE: desplazamiento en X, giros en Y y Z fijos.
- Punto E fijo en todos los grados de libertad.

### Cargas:

- Punto A: fuerza de 2kN en dirección radial, sentido hacia el centro.
- Punto C: fuerza de 2kN en dirección radial, sentido hacia el exterior.

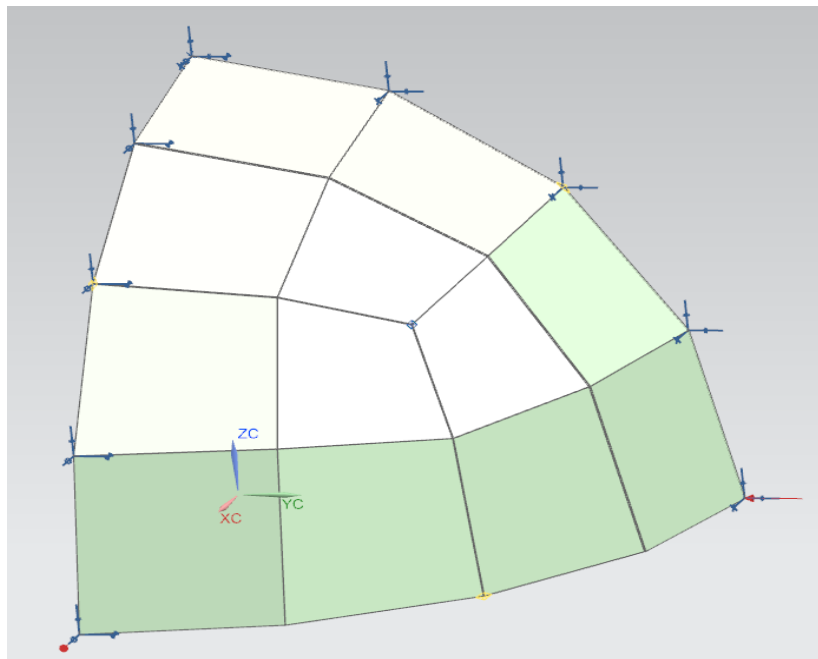


Ilustración AI - 4.14: Condiciones de contorno BN3.



## Resultados

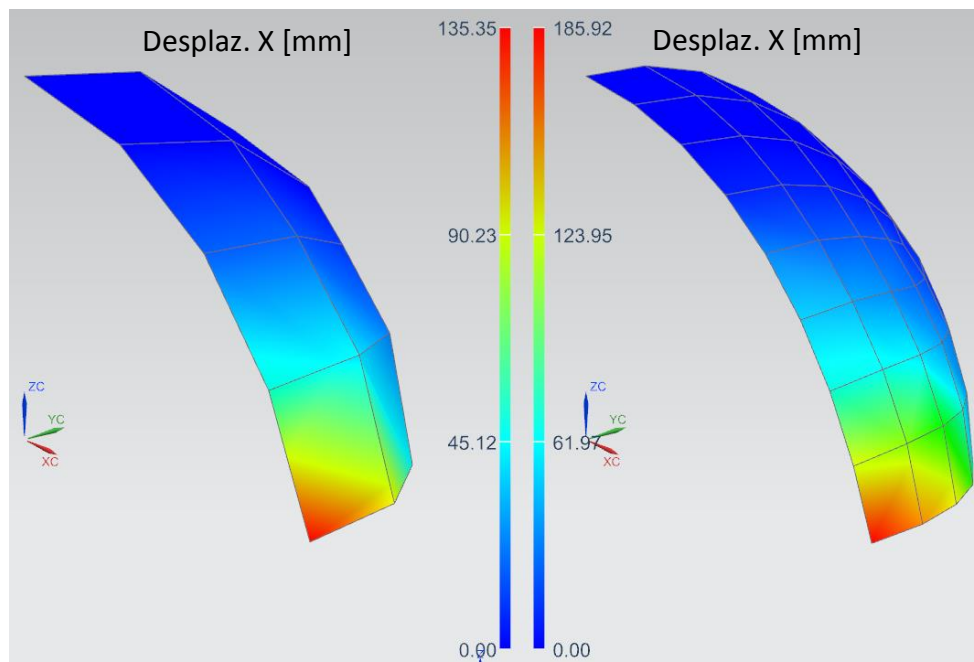


Ilustración AI - 4.15: Resultados BN3 - linear quad.

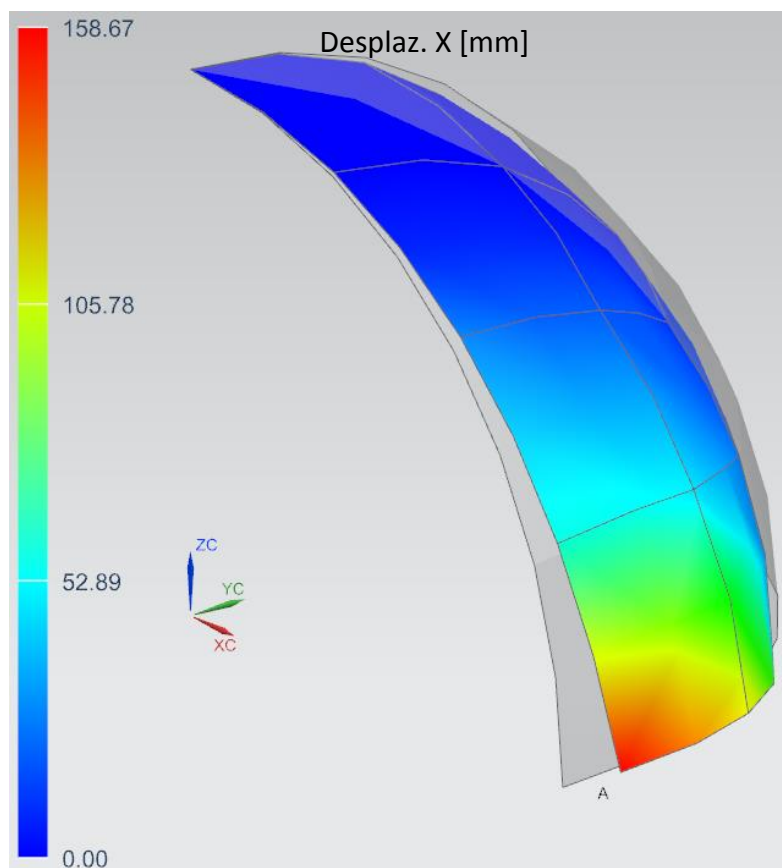


Ilustración AI - 4.16: Resultado BN3 - parabolic quad.

**Output:****Desplazamiento  
[mm] en dirección****Benchmark *Nastran* Error *Samcef* Error****X del punto A.**

Linear quad – malla basta		184,8	0,2	135,4	49,6
Linear quad – malla fina	185	186,5	1,5	185,9	0,9
Parabolic quad – malla basta		141,6	43,4	158,7	26,3

Tabla AI - 4.4: Tabla de resultados BN3.

Tal y como puede observarse en la *tabla 4.4*, las simulaciones ejecutadas sobre mallas lineales reproducen peor la situación inicialmente, aun así, afinando la malla, puede observarse como los resultados aproximan notablemente mejor, llegando incluso a ser más precisos que los de *Nastran*. En el caso de los elementos parabólicos, se corrobora que *Samcef* es más preciso en este problema concreto.

**AI - 4.5. BN4 - Ménsula de con sección en Z - NAFEMS LE5**

Este test es un análisis elástico lineal de una ménsula con sección en Z, se utilizarán mallas de elementos planos (*shell*). Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE5 (*NAFEMS 1986d*).

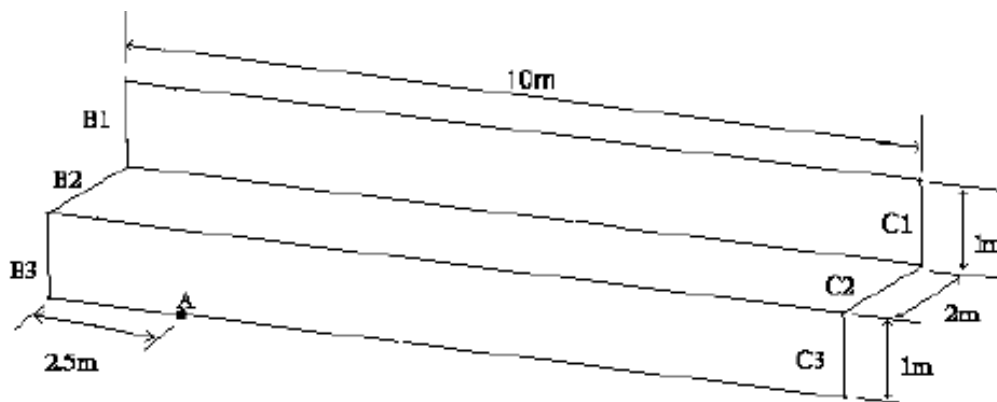
**Esquema y geometría**

Ilustración AI - 4.17: Geometría BN4.

**Unidades:** sistema internacional.

**Longitud:** 10 m

**Espesor:** 0,1 m

**Material: isotrópico**

$E = 210e3 \text{ MPa}$

$\nu = 0,3$

**Mallado**

**Mallado mediante elementos 2D:**

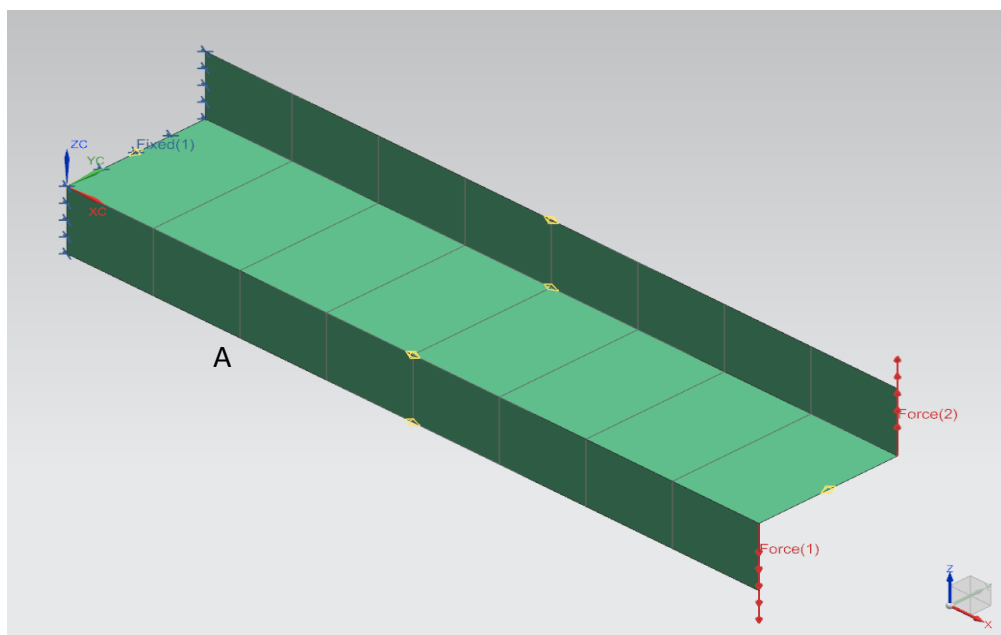
- Linear quad: Mindlin *Shell* [T29] (4).
- Parabolic quad: Heterosis *Shell* [T156] (8).

**Control de malla:** 1x8 elementos en cada cara plana (fig. XX).

**Condiciones de contorno**

**Restricciones:** un extremo fijo en todos los grados de libertad.

**Cargas:** momento de 1,2 MNm aplicado en el extremo libre, mediante dos fuerzas opuestas de 0,6 MN aplicadas en los bordes C1 y C3.



**Ilustración AI - 4.18: Condiciones de contorno BN4.**

## Resultados

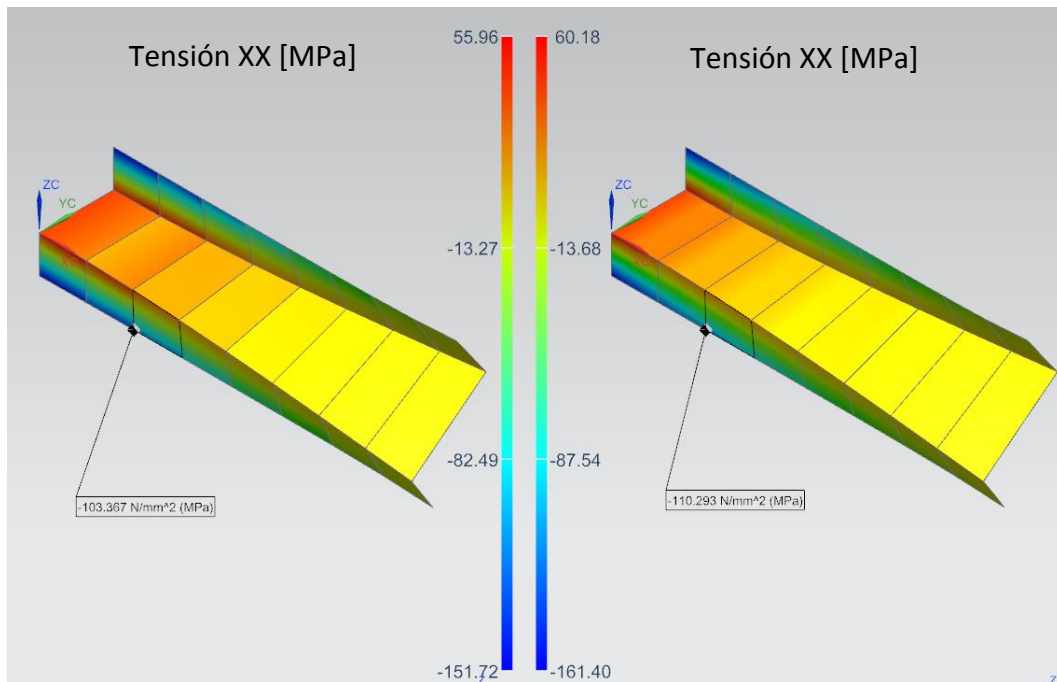


Ilustración AI - 4.19: Resultados BN4.

**Output: Tensión axial (XX) en el plano medio del punto A**

	Benchmark	<i>Nastran</i>	Error	<i>Samcef</i>	Error
Linear quad	-108,0	-111,0	3,0	-103,4	4,6
Parabolic quad		-110,3	2,3	-110,3	2,3

Tabla AI - 4.5: Tabla de resultados BN4.

Tal y como puede apreciarse en la *tabla 4.5*, los resultados aportados por *NX Nastran* y *NX Samcef* son diferentes cuando se utilizan elementos lineales e iguales cuando se implementan elementos cuadriláteros parabólicos.

## AI - 4.6. BN5 - Lámina sesgada – NAFEMS LE6

Este test es un análisis elástico lineal de una lámina sesgada, se utilizarán mallas bastas y finas de elementos bidimensionales tipo *shell*. Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE6 (NAFEMS 1989).

### Esquema y geometría

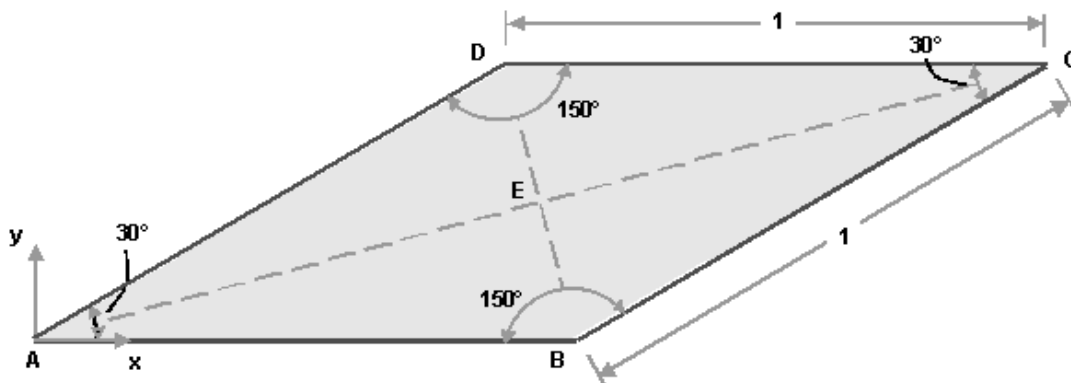


Ilustración AI - 4.20: Geometría BN5.

**Unidades:** sistema internacional.

**Lados:** 1 m.

**Angulo de sesgado:** 60°

**Espesor:** 0,1 m.

**Material:** isotrópico

$E = 210 \text{e}3 \text{ MPa}$ .

$\nu = 0,3$

### Mallado

**Mallado mediante elementos 2D:**

- Linear quad: Mindlin *Shell* [T29] (4).
- Parabolic quad: Heterosis *Shell* [T156] (8).
- Linear tria: Mindlin *Shell* [T28] (3).
- Parabolic tria: Heterosis *Shell* [T155] (6).

**Dos densidades de mallado:**

- Malla basta: control de malla de 2x2 elementos (*fig. 4.21*).
- Malla fina: control de malla de 4x4 elementos (*fig. 4.22*).

## Condiciones de contorno

**Restricciones:** lados AB, BC, CD y DA: desplazamiento en Z fijo.

**Cargas:** presión de -0,7 kPa en la superficie ABCD.

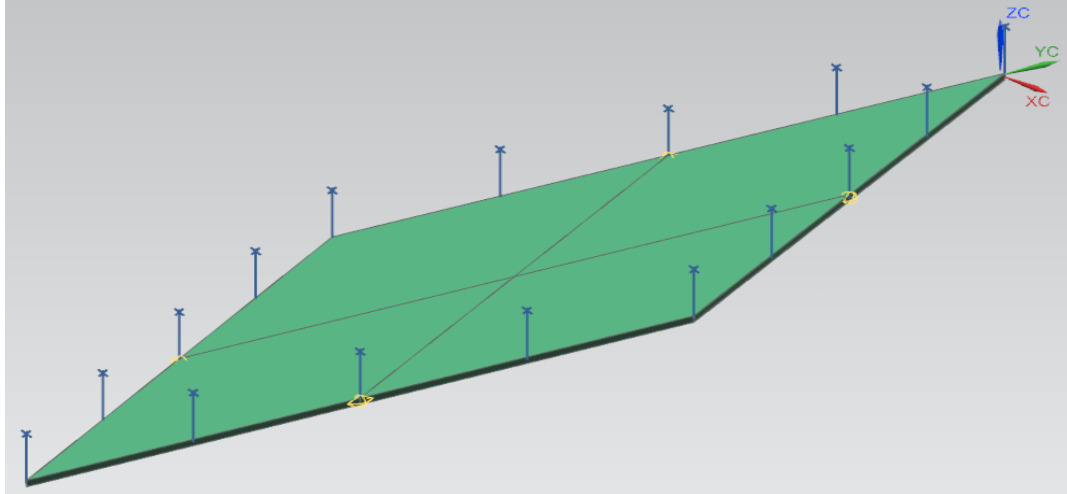


Ilustración AI - 4.21: Condiciones de contorno BN5 – malla quad.

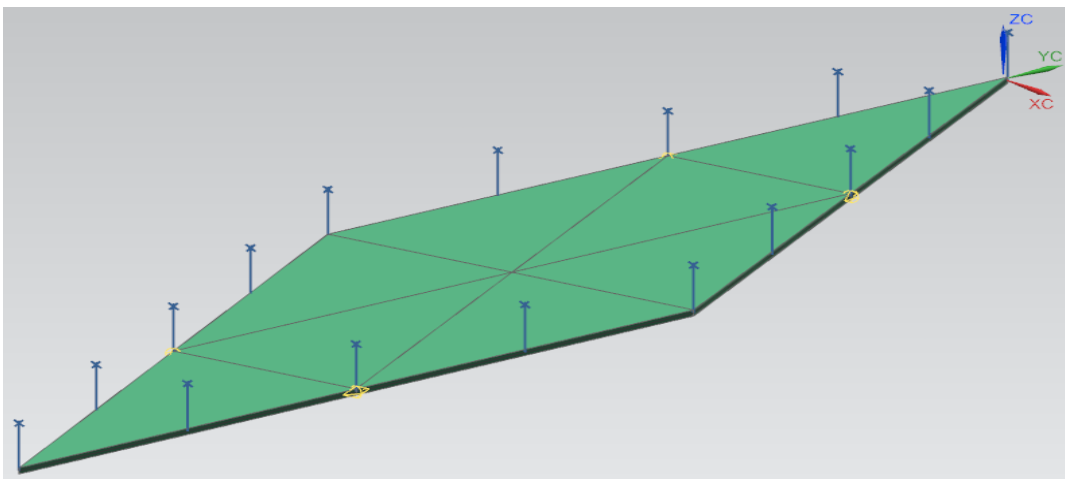


Ilustración AI - 4.22: Condiciones de contorno BN5 – malla tria.

## Resultados

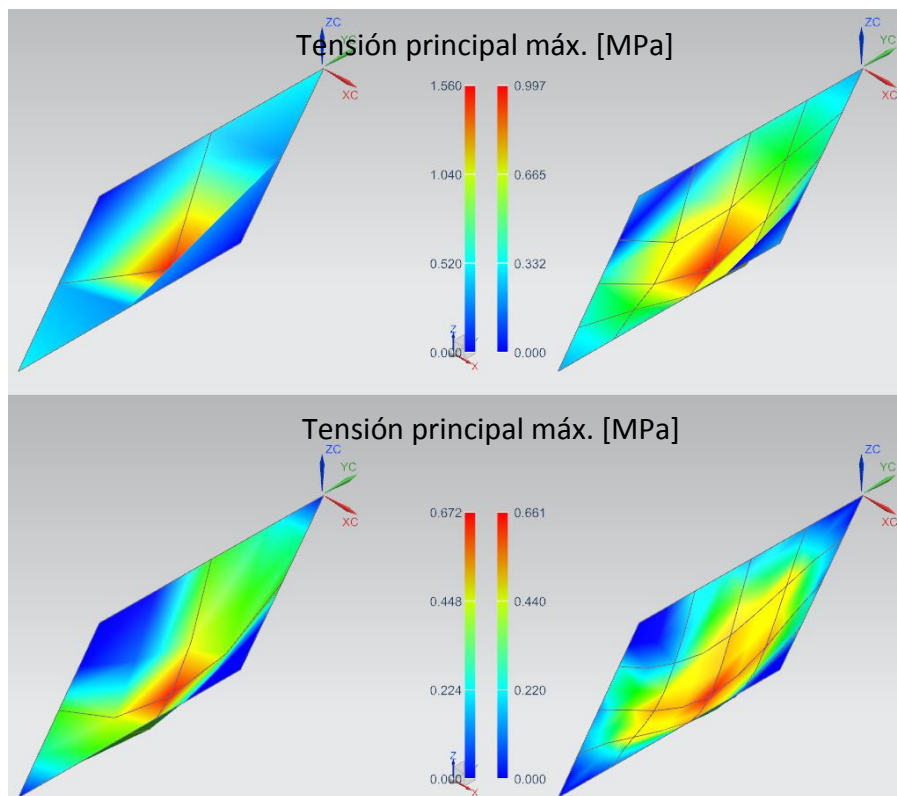


Ilustración AI - 4.23: Resultados BN5 - quad.

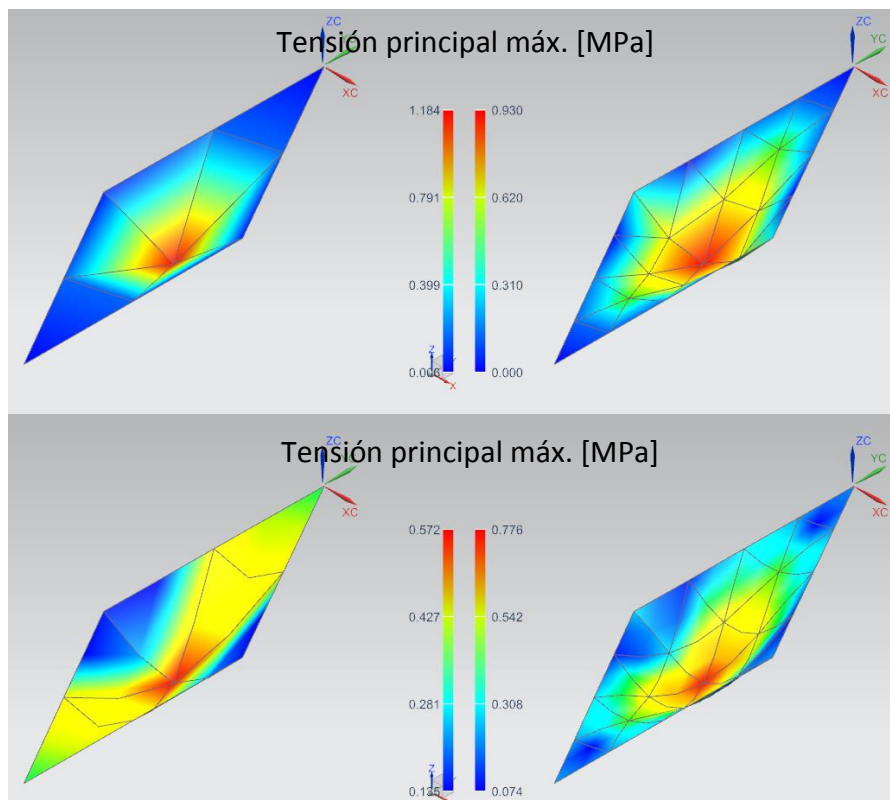


Ilustración AI - 4.24: Resultados BN5 - tria.

**Output: Tensión principal máximo [MPa] en el nodo central de la lámina.**

	<b>Benchmark</b>	<b><i>Nastran</i></b>	<b>Error</b>	<b><i>Samcef</i></b>	<b>Error</b>
Linear quad – malla basta	0,802	0,325	0,477	1,560	0,758
Linear quad – malla fina		0,683	0,119	0,997	0,195
Parabolic quad – malla basta		0,625	0,177	0,672	0,130
Parabolic quad – malla fina		0,719	0,083	0,661	0,141
Linear tria – malla basta		0,396	0,406	1,184	0,382
Linear tria – malla fina		0,720	0,082	0,930	0,128
Parabolic tria – malla basta		0,926	0,124	0,572	0,230
Parabolic tria – malla fina		0,857	0,055	0,776	0,026

**Tabla AI - 4.6: Tabla de resultados BN5.**

Este caso en particular ofrece bastante información del comportamiento de los elementos, puesto que se utilizan los cuatro elementos *shell* diferentes, todos en dos calidades de malla. Se aprecia en la *tabla 4.6* como el elemento *quad* lineal es el menos preciso de todos y que se encuentra mejor programado en *Nastran*. En cambio, los elementos parabólicos cumplen razonablemente, sobretudo el elemento *tria*, que parece converger mucho más rápido en relación al número de elementos en la malla. Por el contrario, los elementos lineales tienden a converger a una velocidad más reducida a medida que se afina la malla.



## AI - 4.7. BN6 - Presión en placa gruesa - NAFEMS LE10

Este test es un análisis elástico lineal de una placa gruesa elíptica, se utilizarán mallas bastas y finas de elementos sólidos. Corresponde con el NAFEMS Standard Benchmark Test LE10 (*NAFEMS 1990*).

### Esquema y geometría

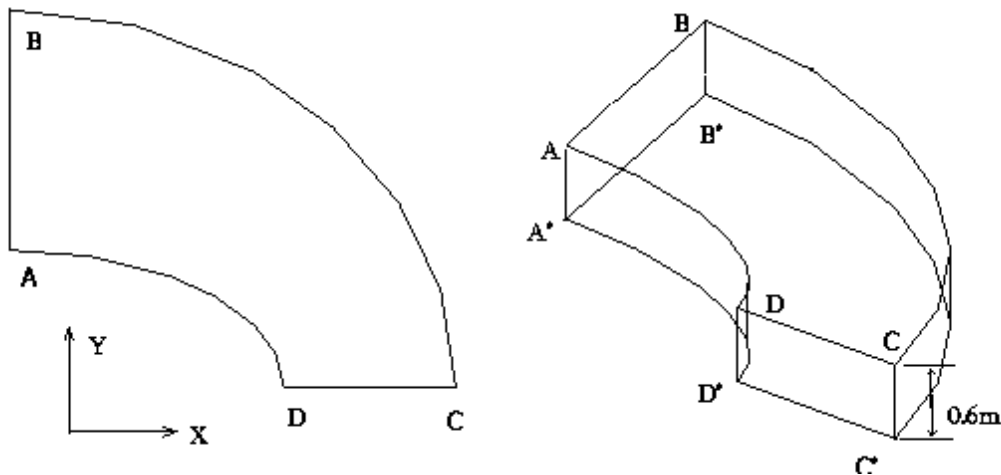


Ilustración AI - 4.25 Geometría BN6.

**Unidades:** sistema internacional.

**Semieje mayor interior:** 2m.

**Semieje mayor exterior:** 3,25 m.

**Semieje menor interior:** 1 m.

**Semieje menor exterior:** 2,75 m.

**Espesor:** 0,6 m.

**Material:** isotrópico

$E = 210e3 \text{ MPa}$ .

$\nu = 0,3$

## Mallado

### Mallado mediante elementos 3D:

- Linear brick: Solid [T8] (8).
- Parabolic brick: Solid [T8] (20).
- Linear wedge: generado mediante el barrido de una malla de elementos Mindlin *Shell* [T29] (4). Estructura de barrido de elemento Solid [T8] (8).
- Parabolic wedge: Mindlin *Shell* [T156] (8) + Solid [T8] (20).
- Linear tetrahedron: Solid [T47] (4).
- Parabolic tetrahedron: Solid [T47] (10).

### Dos densidades de mallado:

- Malla basta: control de malla de 3x2x2 elementos (*fig. 4.26*).
- Malla fina: control de malla de 6x4x2 elementos.

## Condiciones de contorno

### Restricciones:

- Cara ABA'B': desplazamiento en X fijo.
- Cara CDC'D': desplazamiento en Y fijo.
- Cara BCB'C': desplazamientos en X y Y fijos.
- Cara BCB'C': desplazamiento en Z fijo en los nodos de la arista bisectriz.

**Cargas:** presión de 1MPa en la superficie ABCD, dirección  $-Z$ .

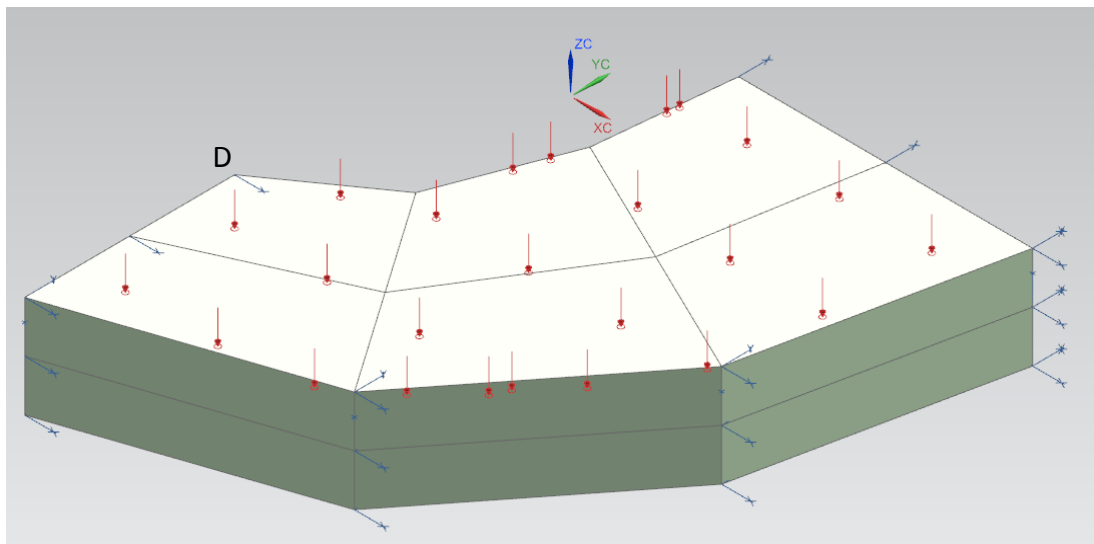


Ilustración AI - 4.26: Condiciones de contorno BN6.

## Resultados

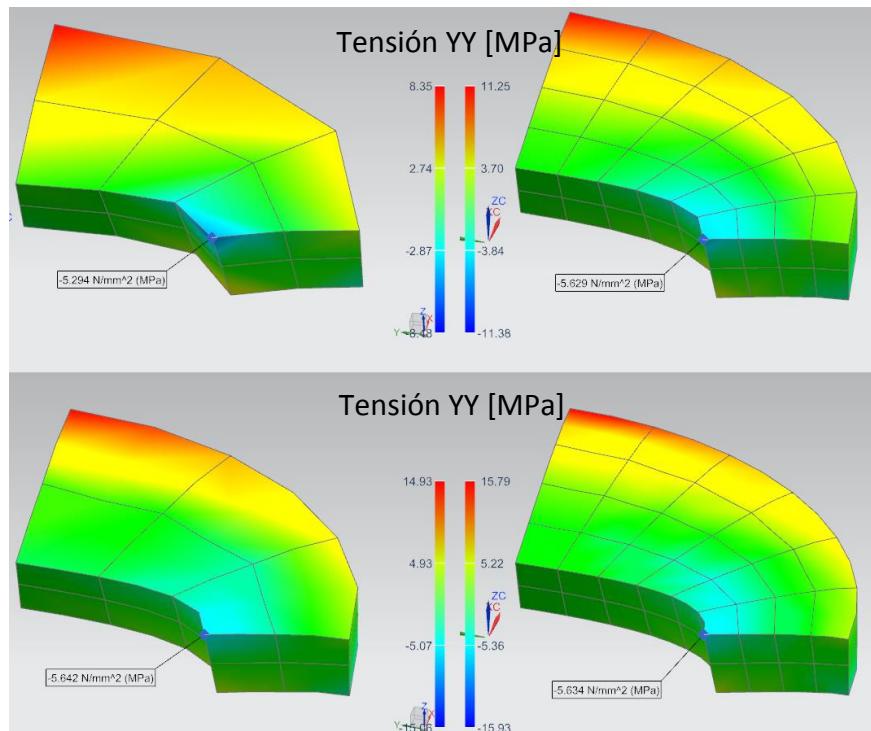


Ilustración AI - 4.27: Resultados BN6 - brick.

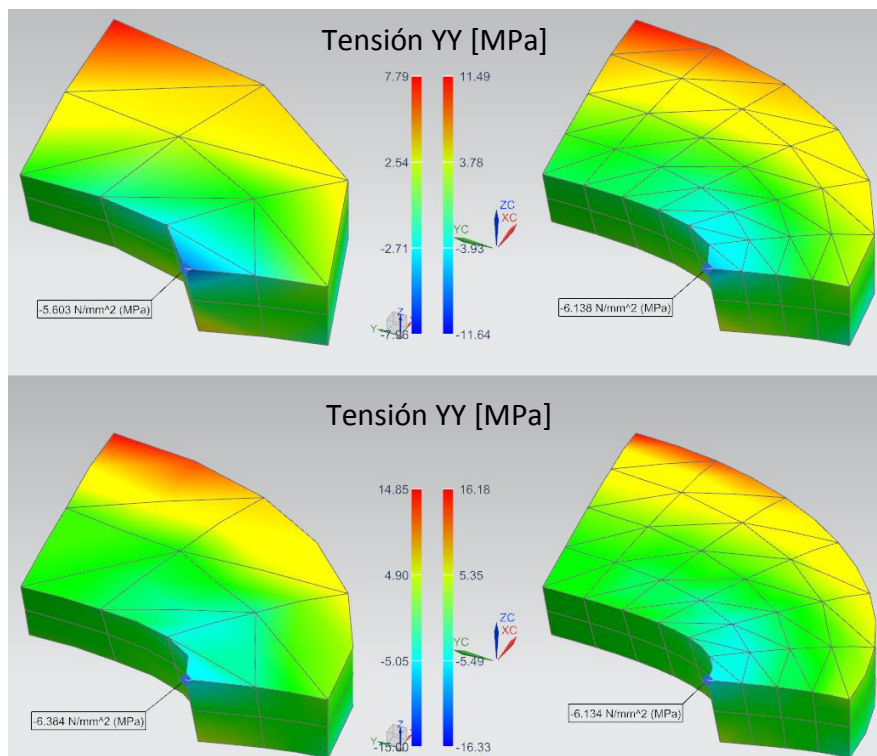


Ilustración AI - 4.28: Resultados BN6 - wedge.

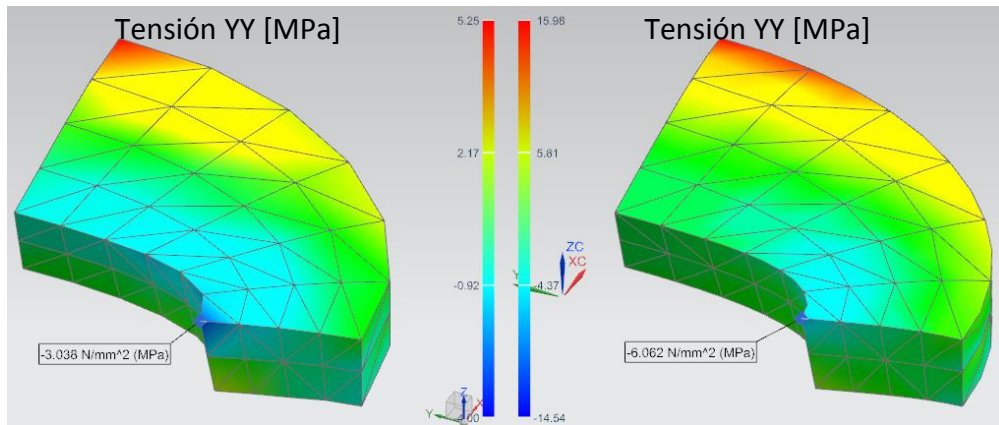


Ilustración AI - 4.29: Resultados BN6 - tetra.

**Output: Tensión [MPa] YY  
(dirección AB) en el punto D.**

	Benchmark	Nastran	Error	Samcef	Error
Linear brick – malla basta	-5,50	-5,41	0,09	-5,29	0,21
Linear brick – malla fina		-5,67	0,17	-5,63	0,13
Parabolic brick – malla basta		-6,13	0,63	-5,64	0,14
Parabolic brick – malla fina		-6,04	0,54	-5,63	0,13
Linear wedge – malla basta		-5,94	0,44	-5,60	0,10
Linear wedge – malla fina		-5,83	0,33	-6,14	0,64
Parabolic wedge – malla basta		-5,32	0,18	-6,38	0,88
Parabolic wedge – malla fina		-6,01	0,51	-6,13	0,63
Linear tetra – malla fina		-2,41	3,09	-3,04	2,46
Parabolic tetra – malla fina		-5,28	0,22	-6,01	0,51

Tabla AI - 4.7: Tabla de resultados BN6.

Como en el test anterior (BN5), este problema de validación trabaja con todos los elementos posibles a diferentes calidades de malla, pero esta vez con elementos tridimensionales.

De la *tabla 4.7*, se puede asumir que, para este problema, los elementos tipo *brick* son más precisos (especialmente el parabólico) y convergen mejor en relación a la calidad de la malla. Asimismo, se concluye que los elementos tipo *wedge* no acaban de cumplir razonablemente en simulación mediante *Samcef*. Este hecho puede ser debido a que se trata de un elemento degenerado.

## AI - 5. Evaluación final de *Samcef*

Finalmente, como se esperaba al tratarse de un programa comercial, puede determinarse *Samcef* como un *solver* válido para el análisis de elemento finitos, en el rango de la simulación elástica lineal. Como se ha podido apreciar en la batería de problemas de validación, *Samcef* cumple razonablemente con la correcta reproducción de los problemas mecánicos estáticos lineales. Asimismo, el presente estudio ha dejado datos interesantes y algunas afirmaciones generalizables.

El primer test (BT1) es el único que utiliza un mallado regular, por lo que no se puede generalizar totalmente, pero parece mostrar que *Samcef* devuelve presuntamente resultados más precisos que *Nastran* trabajando con mallas regulares.

De todos modos, lo que sí es generalizable, como era de esperar, es que los elementos parabólicos parecen ser los que mejor funcionan en *Samcef*. Tales elementos generalmente convergen con mayor rapidez en relación al número de elementos, al ir afinando las mallas, en comparación con *Nastran*. Del mismo modo, los elementos lineales solamente parecen converger más rápidamente, en *Samcef*, al afinar las mallas en los problemas BN1 y BN3.

Por el contrario, se puede observar una tendencia generalizada de los elementos lineales a devolver resultados menos precisos cuando se calcula con *Samcef*. Dicha falta de precisión puede ser observada en los problemas BN1, BN3 y BN4. En conclusión, se remarca que el uso de elementos parabólicos genera, normalmente, resultados más precisos que los elementos lineales, a igual número de elementos. Nótese que tales elementos son también más caros, puesto que los cálculos con elementos parabólicos requieren más tiempo, a igual número de elementos. Este hecho es causa del elevado número de nodos que tiene cada elemento parabólico. Dado que los elementos lineales son más baratos, muchas veces se debe tener en cuenta su uso, sobretodo en cálculos con elevadas cantidades de elementos.

A pesar de los resultados razonables obtenidos, se ha encontrado problemática y resultados imprecisos en el test BN2. Tales imprecisiones parecen ser debidas a una incorrecta aplicación de las cargas (dirección errónea) y a una pésima calidad de malla, tanto en densidad como geometría de los elementos. Estos hechos no niegan que *Samcef* sea capaz de solucionar correctamente el test, sino que, al parecer, la carga no se encuentra bien aplicada. Asimismo, al *resolver* con una malla fina y regular, se corrobora que la calidad de la malla es también causante del error comentado.

En cuanto a los elementos tridimensionales, estos solo han sido utilizados en el test BN6, que apunta paradójicamente (en comparación con los elementos bidimensionales) a que el cálculo con elementos tetraédricos resulta más preciso en *Samcef*. Sucede lo contrario con la velocidad de convergencia en función del número de elementos de la malla, que parece ser más elevada con los elementos tetraédricos en *Nastran*. Dicho test apunta también que los elementos tipo *wedge* resultan ser los elementos tridimensionales menos precisos en cálculos con *Samcef*. Asimismo, también se ha podido valorar que los elementos tipo *brick* tienden a reproducir con *Samcef* resultados más precisos que con *NX Nastran*.

A modo de resumen final, se realiza una tabla comparativa de los errores promedio de los casos estudiados. En ella aparecen tanto los errores generados por *NX Nastran* como por *NX Samcef*. Nótese que para el cálculo del error promedio no se han tenido en cuenta los resultados reportados en el segundo caso del test BN2, por no ser razonablemente admisibles.

	<i>Nastran</i>	<i>Samcef</i>
<b>Error promedio</b>	7,5%	10,0%

**Tabla AI - 5.1: Promedio de errores (a excepción de los resultados BN2 – case 2).**

Como puede apreciarse en la *tabla 5.1*, *NX Nastran* parece ser más preciso y mejor reproductor de la realidad, con un error relativo promedio del 7,5%. Asimismo, el error promedio producido en las simulaciones mediante *NX Samcef* se sitúa en torno al 10% para casos estáticos lineales, sin tener en cuenta los resultados comentados del segundo caso del test BN2, los cuales no se han aceptado como válidos por los motivos expuestos anteriormente.



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

---

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

# **Estudio mecánico de un componente de automoción utilizando herramientas de simulación numérica**

**EMSN.001**

---

## **ANEXO II - Simulación mecánica de una biela**

## AII - 1. Introducción

La función del presente documento es exponer y argumentar las decisiones tomadas en la simulación mecánica mediante elementos finitos de una biela de motor de combustión alterna. Tal y como se ha expuesto en el documento referente al estudio de las bielas, las más utilizadas son las bielas de acero AISI 4340, fabricadas mediante forja. Habitualmente con plano de unión recto entre sombrerete y cuerpo, mediante pernos de fijación.

La simulación realizada en el presente proyecto pretende ilustrar las cargas mecánicas que afectan a la biela. Se toman valores moderados y habituales, utilizando como base de medidas un motor convencional de gasolina de un turismo, definido a continuación en las hipótesis de trabajo.

Como se ha expuesto, los resultados obtenidos son generados mediante la aceptación de hipótesis que alejan el problema de la realidad. Dado este hecho, cabe mencionar que nunca deberán ser tomados como realidad absoluta e indiscutible. Las herramientas de simulación mediante elementos finitos permiten obtener información básica útil de los patrones tensionales. Dicha información se puede utilizar para localizar errores prematuros de diseño o identificar las posibles zonas de máxima tensión. En ningún caso deberá ser considerarse como información empírica, puesto que proviene de una simulación implementada mediante hipótesis.

## AII - 2. Hipótesis

Primeramente, se deben tener en cuenta las condiciones restrictivas planteadas en las especificaciones básicas del proyecto. Dichas hipótesis de partida son citadas a continuación:

- El estudio se limitará a la simulación lineal.
- El estudio se limitará al carácter mecánico del ciclo de trabajo, sin tener en cuenta los efectos de las cargas térmicas.
- No se realizará estudio térmico alguno del componente. Para los estudios a realizar no se tendrán en cuenta los efectos térmicos de dilatación, compresión o variación de propiedades mecánicas del componente.
- Tampoco se generarán estudios y simulaciones de respuesta en frecuencia.
- No es necesario un dimensionado y diseño completo del componente. Este proyecto contempla el estudio de modelos ya existentes.



Paralelamente a las especificaciones básicas del proyecto, deben realizarse otras hipótesis para una correcta implantación del modelo. A continuación se procede a la descripción de las mismas y las condiciones técnicas que las avalan:

1. **Material seleccionado: AISI 4340.** Tal y como se expone en el estudio del componente, el acero AISI 4340 es el más utilizado para la fabricación de bielas.
2. **Régimen estable.** Por tal de realizar una simulación elástica estática lineal, es preciso establecer un régimen de trabajo constante, sin variaciones en la velocidad angular del motor ni en la presión ejercida en la cámara de explosión. Tales valores constantes se asignarán posteriormente tomando como referencia el régimen de giro que aporta mayor par motor.
3. **Giro antihorario.** Por tal de estandarizar el movimiento del cigüeñal, se considera el ángulo girado en sentido horario.
4. **Posiciones a estudiar.** Dado que se trata de un estudio lineal estático, no se puede estudiar el ciclo de trabajo completo, sino que se debe estudiar cada posición concreta por separado. Dada la limitación temporal para realizar el trabajo, se ha considerado estudiar las posiciones correspondientes al ángulo girado por el cigüeñal de  $0^\circ$  (PMS),  $180^\circ$  (PMI) y  $\arccos\left(-\frac{1}{4\lambda}\right)$ . Este último se estudia en la carrera de admisión, y los casos del PMS y PMI se estudian en la de expansión.
5. **PMS y PMI.** Cabe mencionar que las condiciones de contorno relacionadas con estas posiciones se considerarán como las que se generan en instantes después de que el émbolo pase por ellas (y durante la carrera de expansión, como se expone anteriormente). Así pues, se darán una serie de condiciones que permitirán tomar como no nula la velocidad del émbolo en estos puntos.
6. **Geometría unificada.** Por tal de mantenerse en un cálculo lineal estático, se ha considerado trabajar la biela como una única pieza, soldando en el modelo CAD el sombrerete y los semicojinetes al cuerpo. Asimismo, se han eliminado los pernos y se ha rellenado de material (AISI 4340) el taladro roscado pasante que los aloja.

Esta hipótesis se justifica mediante la restricción impuesta de simular linealmente el componente y en que no se pretende estudiar las cargas en los pernos, sino en el cuerpo de la biela. Por tal de mantener la linealidad, no puede haber contactos discretos, como es el caso del plano de unión entre sombrerete y cuerpo. Asimismo, dado que no es objeto de estudio la resistencia de los pernos, estos pueden ser sustituidos por material sólido, siempre que se trabaje por debajo de su resistencia mecánica.

7. **Elementos: tetraédricos parabólicos.** Mediante un análisis de los resultados obtenidos en la validación de *Samcef* y la geometría de la biela, se decide implementar la malla con elementos tetraédricos parabólicos. A pesar de no ser aparentemente los más precisos (en el test BN6 los elementos *brick* reproducen mejores resultados), dada la geometría irregular y con multitud de curvas, los elementos más factibles de utilizar son los tetraédricos.

Asimismo, como se ha contrastado en la validación, los parabólicos generan resultados más precisos en detrimento de un mayor tiempo de cálculo. Puesto que el tiempo de cálculo no es un problema aparente en esta simulación (dada la reducida complejidad de la misma), se decide utilizar elementos parabólicos para obtener una solución más precisa.

8. **Presión.** Dado que se debe pasar de un proceso real dinámico a uno hipotético estático, deben realizarse hipótesis sobre la presión de la cámara de combustión. Para los tres casos a estudiar, se define la presión en cada uno como:

Caso; ángulo girado	Presión en la cámara de combustión
Caso 1; 0° (PMS)	Presión máxima (P).
Caso 2; 180° (PMI)	Presión atmosférica.
Caso 3; $\arccos(-1/4\lambda)$	Presión negativa de aspiración $\cong 0$ .

**Tabla AII - 2.2: Presiones en la cámara de combustión.**

Para el caso del PMS, se considera la presión en la cámara de combustión como la presión máxima, a pesar de que esta se alcanza instantes después de esta situación, es la presión conocida que más se asemeja a las condiciones reales.

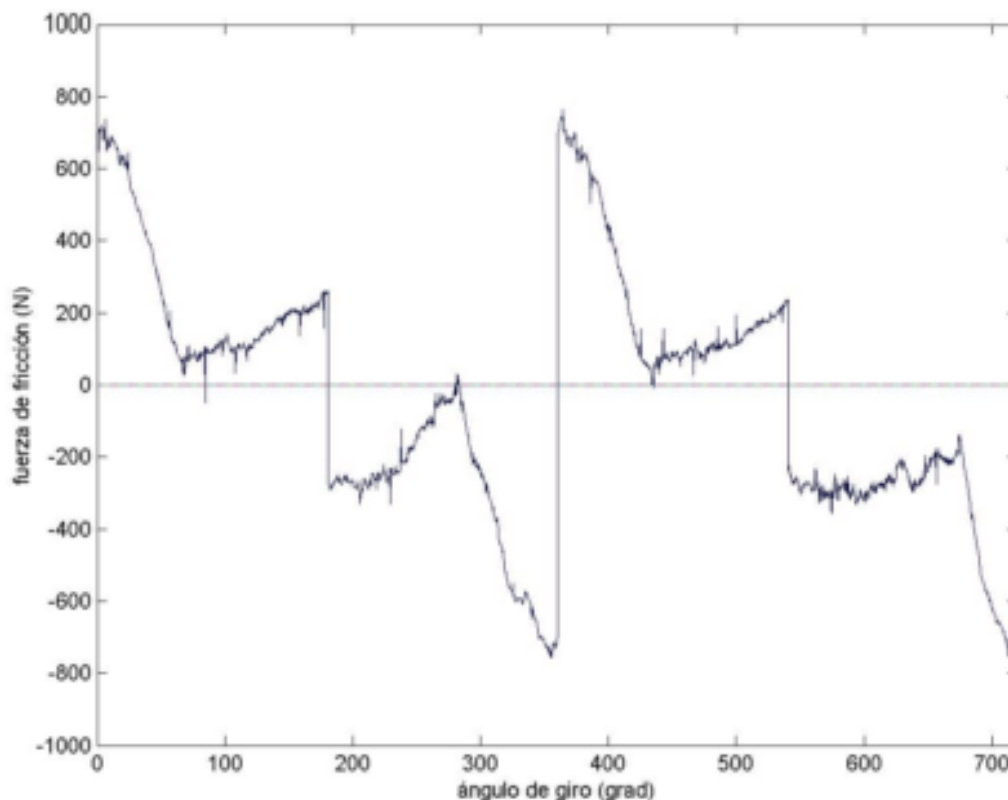
En el caso del PMI, es conocido que todavía queda un reducto de presión, pero esta es mínima y muy cercana a la presión atmosférica que tendrá la cámara en el tiempo de expulsión de gases.

Finalmente, la presión en el tercer caso, dado que la situación a estudiar corresponde a la carrera de admisión, la presión que se ejerce sobre el émbolo es negativa. Debido a que se está aspirando mezcla de los colectores de admisión. Dado que los motores están diseñados para reducir esta presión, se considerará despreciable e igual a cero en el tercer caso de estudio.

9. **Fricción entre componentes.** Atendiendo al estudio del componente, se justifican las cargas de fricción implementadas. Las pérdidas de fricción en los cojinetes de un motor de gasolina siguen la fórmula empírica obtenida por Bishop (*Corallo, Vassallo y Dall’Orto 2003*):

$$F[N] = 41,4 \cdot \frac{D_{piston}}{L_{carrera}} \cdot N \cdot 0,14 \cdot S$$

Siendo ‘*N*’ la velocidad angular del motor en revoluciones por minuto y ‘*S*’ la superficie de aplicación de la fuerza del cojinete, en metros cuadrados. Asimismo, las pérdidas de fricción entre la camisa y el cilindro se definen mediante la siguiente gráfica (*Casanova y Aguirre 2005*), en función del ángulo girado por el cigüeñal durante su ciclo de trabajo.



**Ilustración AII - 2.30: Fuerza de fricción camisa-pistón. Fuente: Casanova y Aguirre.**

De la gráfica presentada en la *il.2.1*, se genera la siguiente tabla:

Caso; ángulo girado	Fuerza de fricción camisa-émbolo
Caso 1; 0° (PMS)	700 N
Caso 2; 180° (PMI)	300 N
Caso 3; $\arccos(-1/4\lambda)$	500 N

**Tabla AII - 2.3: Fuerzas de fricción camisa-émbolo en cada caso.**

10. **Fuerzas inerciales.** Recurriendo también al estudio del componente, de consideran las fuerzas inerciales causadas tanto por el movimiento alternativo, como por el circular. Los módulos de dichas fuerzas son, respectivamente (*Comas 2010*):

$$F_a = m_a \cdot a = m_a \cdot r\omega^2(\cos \theta + \lambda \cdot \cos 2\theta)$$

$$F_c = m_c \cdot r\omega^2$$

Siendo ' $m_a$ ' la masa alterna estimada y ' $m_c$ ' la masa centrífuga, ambas en kilogramos. La fuerza inercial alterna actúa en la dirección axial de la carrera y la fuerza inercial centrífuga siempre en dirección normal a la trayectoria circular. Puede observarse como no existen fuerzas inerciales tangenciales al movimiento circular debido a que se considera trabajar en un régimen estable.

11. **No aplicación fuerza inercial centrífuga.** Dado que la fuerza de inercia producida por la aceleración normal se aplica en el agujero del pie, está no tiene representación en la presente simulación. Este hecho se debe a que dicha fuerza tiene siempre una dirección radial respecto el cigüeñal. Al estar los desplazamientos en este extremo de la biela restringidos en tal dirección, dicha fuerza no afecta a la biela como cuerpo libre. La fuerza inercial centrífuga solo afecta al cigüeñal, produciendo esfuerzos de tracción sobre este.
12. **Punto de aplicación fuerza inercial alterna.** En términos de diseño de motores es ampliamente aceptada la hipótesis de tomar la biela como un elemento de unión entre el cigüeñal y el pistón, consistente en dos masas puntuales situadas en sus extremos (*Comas 2010*). Dada esta simplificación se razona que la fuerza de inercia alterna se aplicará en el pie de la biela.
13. **Implementación contacto eje-agujero.** Dado que se trabajará con un módulo de simulación lineal, como se ha expuesto anteriormente, no pueden existir contactos no lineales. Así pues, para poder aplicar las fuerzas en las superficies internas de los agujeros de la biela se considera que estas fuerzas solo actúan en la semiesfera correspondiente a la dirección de la fuerza (*Kates y Luck 1981*).

14. **Fuerzas axiales puras.** Tal y como exponen los fundamentos de la mecánica de sólidos, si un cuerpo biarticulado (ideal) en sus extremos, de masa despreciable, se encuentra sometido en sus apoyos a fuerzas cortantes, éstas no se verán desde el punto de vista del sólido libre. Por este motivo, se puede asegurar que las fuerzas aplicadas con cierto ángulo en los extremos de biela generarán únicamente esfuerzos axiales.
15. **Motor seleccionado: parámetros constructivos.** Por tal de poder aplicar valores concretos, se necesitan definir ciertos parámetros constructivos del motor a simular. Dado que no es objeto de este proyecto el diseñar un motor, se decide tomar valores de referencia para un motor centrado y cuadrado de gasolina perteneciente a un turismo de admisión atmosférica (Comas 2010):

Parámetro	Valor
Diámetro cilindro ( $D$ ) [m]	0,086
Carrera ( $s$ ) [m]	0,086
Relación Carrera/Diámetro ( $s/D$ )	1,0
Régimen de giro – par máx. ( $N$ ) [rpm]	3500
Presión media efectiva ( $pme$ ) [kPa]	910
Presión máxima ( $P$ ) [bar]	27

Tabla AII - 2.4: Valores referencia de parámetros constructivos – 1.

De la *tabla 2.3*, se obtienen directamente los demás parámetros que serán necesarios posteriormente (excepto la longitud de la biela, que se obtiene del modelo CAD), completando así la tabla siguiente:

Parámetro	Valor
$N$ [rpm]	3500
$\omega = N \cdot \pi / 30$ [rad/s]	366,5
$D = s$ [m]	0,086
$S_{pistón} = \pi \cdot D^2 / 4$ [m]	0,006
$r = s / 2$ [m]	0,043
$l$ [m]	0,160
$\lambda = r / l$ [adim.]	0,269
$pme$ [kPa]	910
$P$ [bar]	27

Tabla AII - 2.5: Valores referencia de parámetros constructivos – 2.

16. **Masas: sistema pistón-biela-cigüeñal.** Tal y como se ha comentado previamente, las masas de los componentes de dicho sistema no se encuentran definidas por el momento. Si bien la masa de la biela puede ser fácilmente determinada a partir del modelo CAD, las masas del émbolo con los segmentos y el bulón deben ser estimadas. Para ello, se procede a consultar con el profesor Ángel Comas la masa media del conjunto émbolo-bulón. Estimándose esta en:

Elemento	Masa [kg]
Émbolo + bulón	0,5
Biela	1,004 $\cong$ 1

Tabla AII - 2.6: Masas de elementos móviles.

Una vez estimadas las masas móviles, se puede proceder a calcular la masa alterna:

$$m_a = m_{\text{émbolo}} + \frac{2}{3} m_{\text{biela}} = 0.5 + \frac{2}{3} \cdot 1 = 1,17 \text{ kg}$$

### AII - 3. Geometría y diseño CAD

Tal y como se expone en las especificaciones básicas del proyecto, no es objeto de este el diseñar y dimensionar completamente una biela. Únicamente se debe obtener una geometría válida y trabajar con ella. Por este motivo, se ha decidido utilizar una geometría ya existente, descargada de [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com), un banco de componentes virtuales en formatos CAD.

De entre todas las bielas allí almacenadas, se ha seleccionado la biela diseñada por Syed Azhar (*il. 3.1*), que contiene el modelado de cuerpo, sombrerete, pernos y cojinetes. Asimismo, dicha biela cumple con las medidas y proporciones razonables de una biela común, tanto en longitud como en los diámetros y anchura del cuerpo.

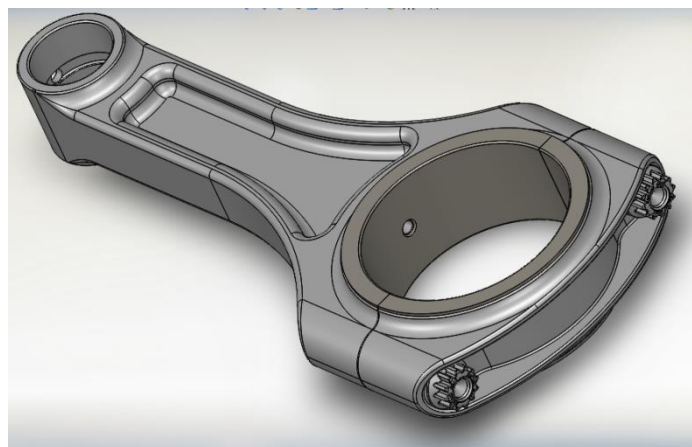
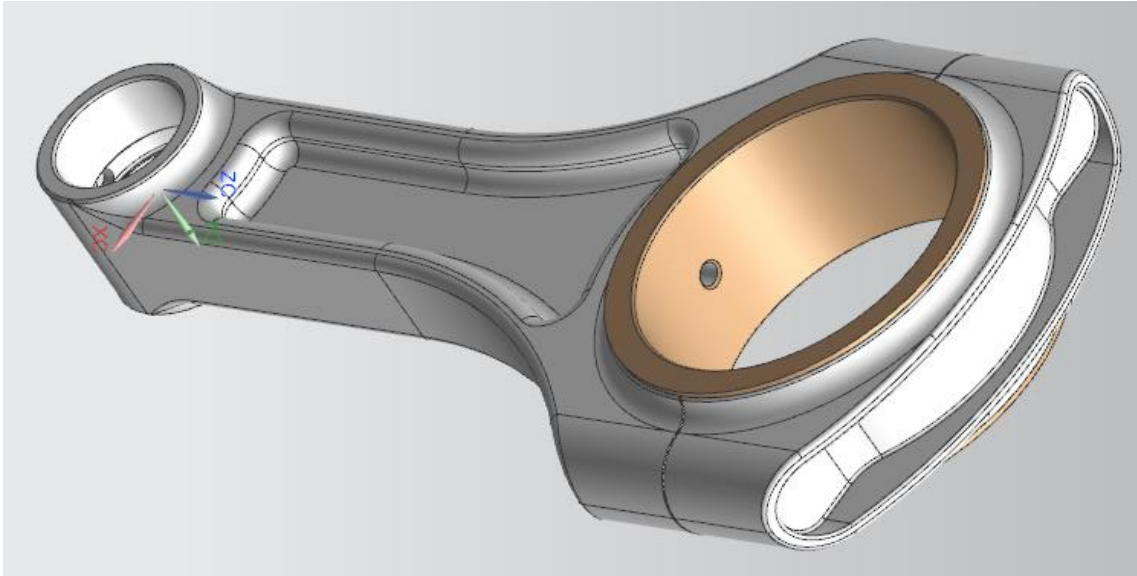


Ilustración AII - 3.1: Diseño CAD de la biela seleccionada. Fuente: [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com).

Una vez importada la biela a NX, deben realizarse ciertas modificaciones por tal de adaptarla a la simulación requerida. Como se expone en las hipótesis, se ha procedido a eliminar los pernos y unificar los componentes. Como se aprecia en la *il. 3.2*, los taladros de los pernos han sido rellenados, y aunque no se pueda apreciar en la imagen, todos los componentes han sido unidos en un solo cuerpo sólido.



**Ilustración AII - 3.2: Diseño CAD de la biela adaptada.**

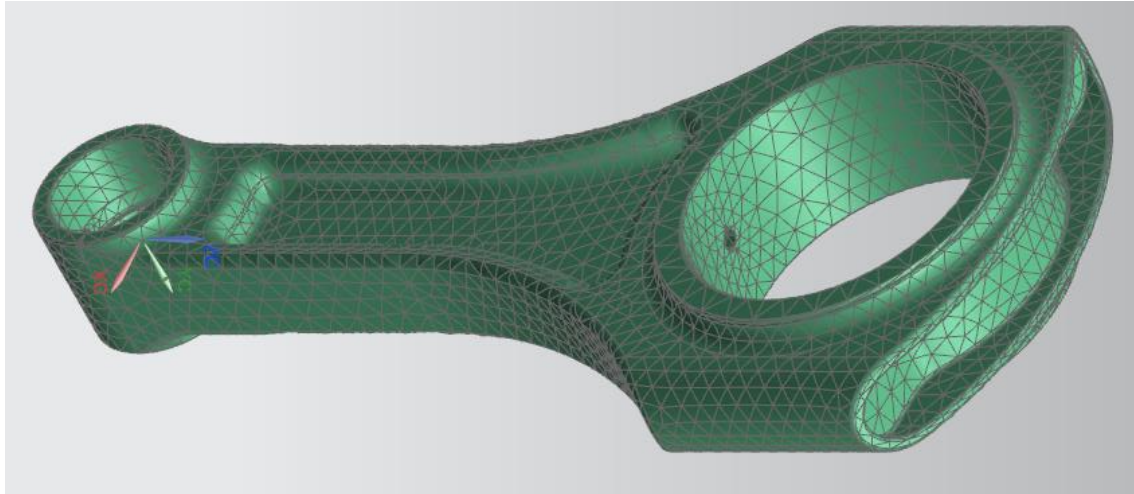
Finalmente, el diseño CAD de la biela se encuentra definido, pudiendo proceder a continuación al mallado del único cuerpo sólido obtenido.

## **AII - 4. Mallado**

El procedimiento de mallado de la presente simulación es relativamente sencillo, como se ha expuesto en las hipótesis, el elemento seleccionado es el tetraédrico parabólico. Dicho elemento es sencillo de implementar en Siemens NX, que cuenta con un potente módulo de mallado automático mediante elementos tetraédricos.

Por tal de configurar el mallado automático, deben conocerse las zonas de mayor estrés tensional, pudiendo afinar la malla de manera global o local por tal de obtener resultados lo más precisos posibles en los nodos más solicitados. El primer cálculo se lanza con los valores de mallado automático por defecto, del mismo modo que el tamaño medio del elemento, que es deducido por el programa y fijado en 6,38 mm.

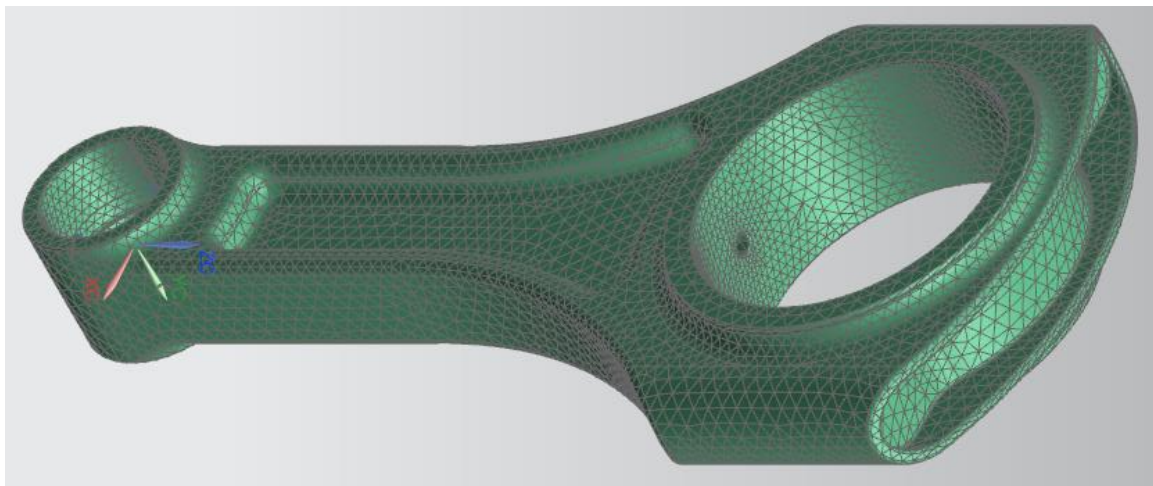




**Ilustración AII - 4.1: Malla basta inicial.**

Como puede apreciarse en la *il. 4.1*, la malla inicial es relativamente basta, contiene 28.522 nodos y 15.700 elementos. Como se ha expuesto anteriormente, esta malla debe afinarse para obtener resultados más precisos.

Dado que se requiere más tiempo para un afinamiento local que para rehacer la malla con un tamaño medio de elemento más pequeño, se considera optar por esta segunda opción. Se malla de nuevo la biela asignando un tamaño medio de los elementos de 4 milímetros, obteniendo mediante el mallado automático una red de 79.789 nodos y 47.243 elementos tetraédricos (*il. 4.2*).



**Ilustración AII - 4.2: Malla afinada.**

Como puede apreciarse en las ilustraciones, la nueva malla afinada tiene mejor calidad y ajusta mejor los elementos a las pequeñas curvaturas que tiene la biela, sobre todo en los redondeos. Con estas dos mallas se puede proceder a simular ambos casos, obteniendo así información sobre la convergencia de resultados en función de la densidad de elementos en la malla.



## AII - 5. Cargas

A continuación se procede a exponer la dirección y magnitud de las cargas, así como sus puntos de aplicación en el modelo CAD. Cuando sea necesario, se determinará la variación de la carga en función del caso de estudio.

### AII - 5.1. Caso 1

#### AII - 5.1.1. Presión

Para el caso del PMS, atendiendo a las hipótesis, la carga es totalmente vertical, aplicada a en la mitad inferior de la superficie interna del ojal del pie de la biela. Dicha fuerza tiene una magnitud de:

$$F_{p,1} = P \cdot S_{pistón} = 27 \text{ bar} * \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}} * 0,006 \text{ m}^2 \cong 16200 \text{ N}$$

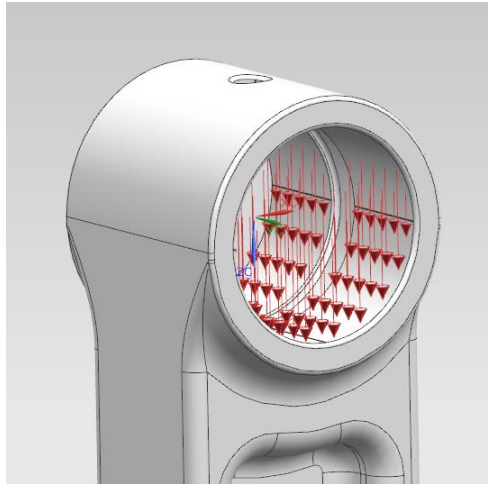


Ilustración AII - 5.1: Aplicación de  $F_p$  en el caso 1.

#### AII - 5.1.2. Fricción cojinetes

Las fuerzas de fricción generadas en las uniones con los cojinetes, como se expone en el estudio del componente, son consideradas:

$$F[N] = 41,4 \cdot \frac{D_{piston}}{L_{carrera}} \cdot N \cdot 0,14 \cdot S$$

Siendo 'S' la superficie interna de acople con el eje. Para los distintos agujeros;

$$S_{pie} = 2\pi R_{pie} \cdot e_{pie} = 2\pi \cdot 0,012 \cdot 0,0145 \cong 0,0011 \text{ m}^2$$

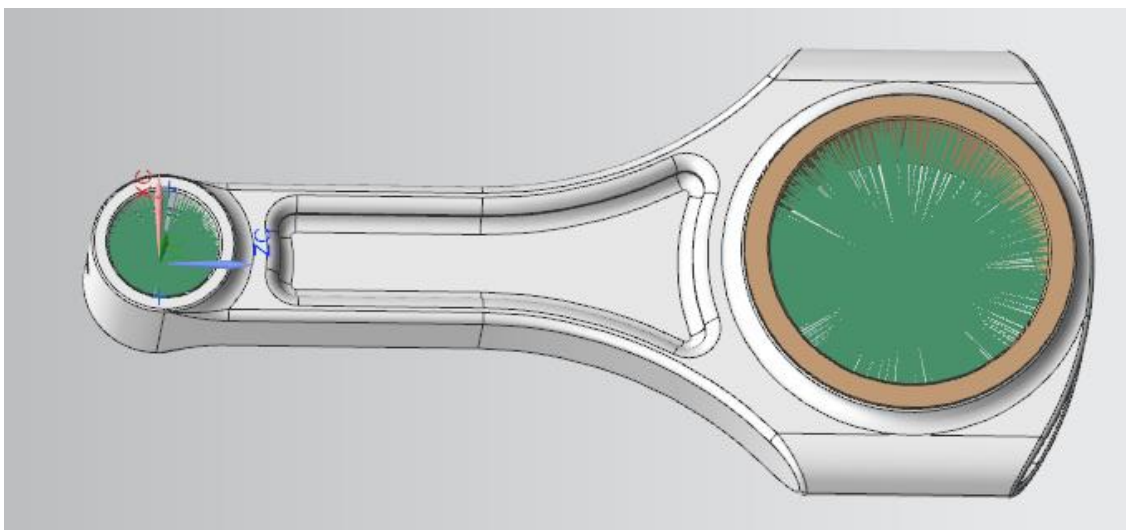
$$S_{cab} = 2\pi R_{cab} \cdot e_{cab} = 2\pi \cdot 0,030 \cdot 0,0145 \cong 0,0027 \text{ m}^2$$

Así pues, la fuerza de fricción será:

$$F_{c, pie}[N] = 41,4 \cdot \frac{0,086}{0,086} \cdot 3500 \cdot 0,14 \cdot 0,0011 \cong 22,31 N$$

$$F_{c, cabeza}[N] = 41,4 \cdot \frac{0,086}{0,086} \cdot 3500 \cdot 0,14 \cdot 0,0027 \cong 54,77 N$$

Por tal de aplicar esta fuerza en la dirección tangencial correspondiente a cada elemento, se genera un enlace RBE a un nodo situado en el punto central de cada agujero (il. 5.2). A dicho nodo enlazado se le aplica un momento igual a la fuerza por el radio del agujero, en dirección horaria.



**Ilustración AII - 5.2: Enlaces RBE en los agujeros de la biela.**

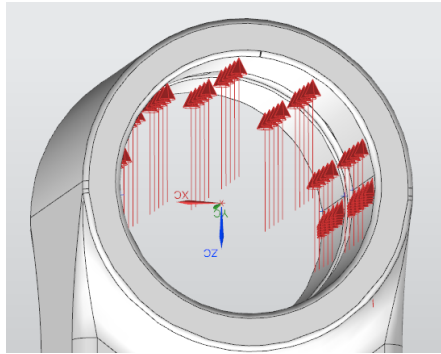
### **AII - 5.1.3. Fricción émbolo**

Para una correcta aplicación de la fricción producida entre la camisa y el émbolo, se considera aplicar una fuerza en la dirección del movimiento lineal, en sentido contrario a dicho movimiento.

En el caso 1, el émbolo está empezando a bajar desde el PMS, por lo tanto, la fuerza se verá aplicada en dirección contraria a la fuerza de la presión. Como se argumenta en las hipótesis, la fuerza de fricción en el caso del PMS es:

$$F_{f,1} = 700 N$$

Dicha fuerza se aplicará en la mitad superior de la superficie interna del agujero de acople del bulón, como se aprecia en la il. 5.3.



**Ilustración AII - 5.3: Fuerza de fricción camisa-émbolo en el caso 1.**

#### **AII - 5.1.4. Fuerza inercial alternativa**

En el primer caso de estudio, cuando el pistón se encuentra en el PMS, la aceleración tiene sentido hacia el eje del cigüeñal (hacia abajo), por lo tanto la fuerza inercial en este punto tendrá sentido contrario, tomando el mismo que la fuerza de fricción entre la camisa y el émbolo (*il. 5.3*).

Dado que todas las variables se han estimado o calculado previamente, se procede a calcular la fuerza inercial alterna:

$$F_{a,1} = m_a \cdot r \omega^2 (\cos \theta + \lambda \cdot \cos 2\theta) = 1,17 \cdot 0,043 \cdot 366,5^2 \cdot (1 + 0,269) \cong 8576 \text{ N}$$

Dicha fuerza inercial se verá aplicada, como la fuerza de fricción citada, en la mitad superior de la superficie interna del agujero que aloja el bulón.

### **AII - 5.2. Caso 2**

#### **AII - 5.2.1. Presión**

En este caso, correspondiente con el PMI, la carga es también totalmente vertical, y se aplica también en la mitad inferior de la superficie interna del ojal del pie de la biela. Esta vez con magnitud:

$$F_{p,2} = P_{atm} \cdot S_{pistón} = 101325 \text{ Pa} \cdot 0,006 \text{ m}^2 \cong 608 \text{ N}$$

#### **AII - 5.2.2. Fricción cojinetes**

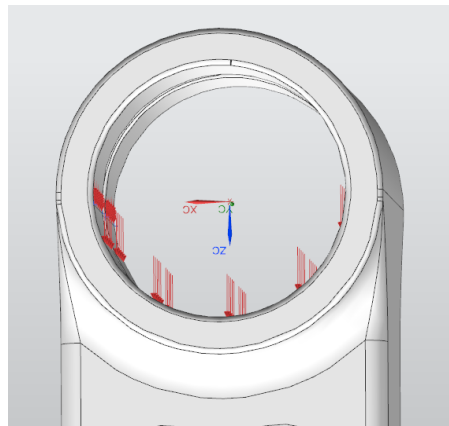
Ídem que el apartado 5.1.2, puesto que la magnitud de la fuerza en los cojinetes no depende de la posición de la biela. Eso sí, la dirección de la fuerza aplicada en el agujero del pie de la biela esta vez es en sentido antihorario, mientras que la fuerza aplicada en el agujero de la cabeza tiene sentido horario.

### AII - 5.2.3. Fricción émbolo

En el caso 2, el émbolo está empezando a subir desde el PMI, por lo tanto, la fuerza se verá aplicada en la dirección de la presión en el émbolo. Como se argumenta en las hipótesis, la fuerza de fricción en el caso del PMI es:

$$F_{f,2} = 300 \text{ N}$$

Dicha fuerza se aplicará en la mitad inferior de la superficie interna del agujero de acople del bulón, como se aprecia en la *il. 5.4*.



**Ilustración AII - 5.4: Fuerza de fricción camisa-émbolo en el caso 2.**

### AII - 5.2.4. Fuerza inercial alternativa

En el segundo caso de estudio, cuando el pistón se encuentra en el PMI, la aceleración tiene sentido hacia el pistón (hacia arriba), por lo tanto la fuerza inercial en este punto tendrá sentido contrario, tomando el mismo que la fuerza de fricción entre la camisa y el émbolo (*il. 5.4*).

$$F_{a,2} = m_a \cdot r\omega^2(\cos \theta + \lambda \cdot \cos 2\theta) = 1,17 \cdot 0,043 \cdot 366,5^2 \cdot (1 - 0,269) \cong 4940 \text{ N}$$

Dicha fuerza inercial se verá aplicada, como la fuerza de fricción citada, en la mitad inferior de la superficie interna del agujero que aloja el bulón.

## AII - 5.3. Caso 3

### AII - 5.3.1. Presión

En este caso, correspondiente con un cierto ángulo girado por el cigüeñal de valor:

$$\arccos\left(-\frac{1}{4\lambda}\right) \cong 21,53^\circ$$

La dirección axial de la biela formará un cierto ángulo con la dirección del movimiento lineal del émbolo. Dicho ángulo puede ser calculado mediante trigonometría del motor centrado (il. 5.5):

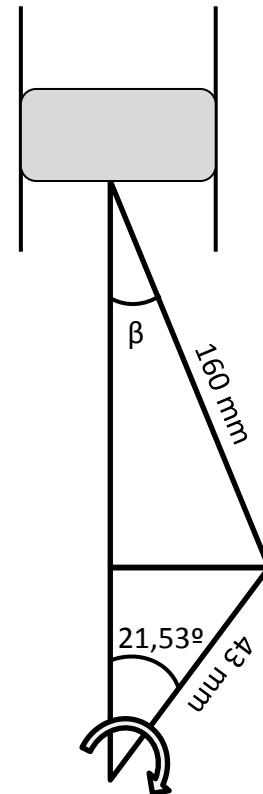
$$\beta = \arcsin\left[\frac{43}{160}\sin(21,53^\circ)\right] \cong 5,66^\circ$$

Dadas las condiciones geométricas de este caso, la fuerza generada por la presión en el émbolo se verá aplicada en la mitad inferior de la superficie interna del ojal del pie de la biela. Dicha aplicación puede apreciarse en la il. 5.6.

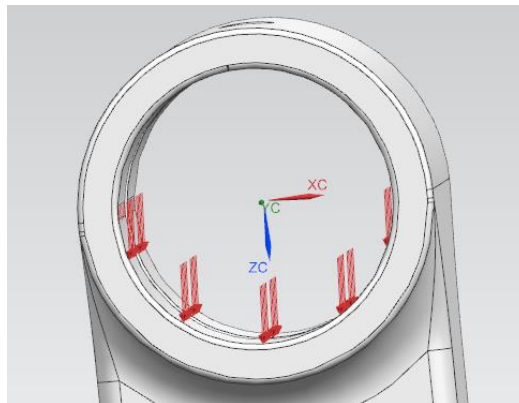
$$F_{p,3} = p_{me} \cdot S_{pistón} = 910000 \text{ Pa} \cdot 0,006 \text{ m}^2 \cong 5460 \text{ N}$$

Asimismo, debe considerarse, como se ha expuesto en las hipótesis, y considerando los apoyos ideales (dado que la fricción de los cojinetes es muy reducida en comparación con las fuerzas causadas por la presión), la biela solo le afectará la componente axial de dicha fuerza, quedando esta aumentada.

$$F_{p,3,axial} = \frac{p_{me} \cdot S_{pistón}}{\cos(\beta)} = \frac{910000 \text{ Pa} \cdot 0,006 \text{ m}^2}{\cos(5,66^\circ)} \cong 5487 \text{ N}$$



**Ilustración AII - 5.5:**  
Esquema ilustrativo de la posición del sistema pistón-biela-cigüeñal en el tercer caso.



**Ilustración AII - 5.6:** Aplicación de  $F_p$  en el caso 3.

### AII - 5.3.2. Fricción cojinetes

Ídem que el apartado 5.1.2, puesto que la fuerza en los cojinetes no depende de la posición de la biela. Esta vez las direcciones sí corresponden con el sentido horario, como en el primer caso.

### AII - 5.3.3. Fricción émbolo

En el caso 3, el émbolo está bajando desde el PMS, por lo tanto, la fuerza se verá aplicada en dirección contraria a la fuerza de la presión. Como se argumenta en las hipótesis, la fuerza de fricción en el tercer caso es:

$$F_{f,3} = 500 \text{ N}$$

Asimismo, debe considerarse, como se ha expuesto en las hipótesis que a la biela solo le afectará la componente axial de dicha fuerza, quedando esta aumentada a:

$$F_{f,3,axial} = \frac{500 \text{ N}}{\cos(5,66^\circ)} = 502 \text{ N}$$

Dicha fuerza se aplicará en la mitad opuesta a la superficie donde se aplicó la carga relacionada con la presión, en la cara interna del agujero de acople del bulón, como se aprecia en la *il. 5.7*.

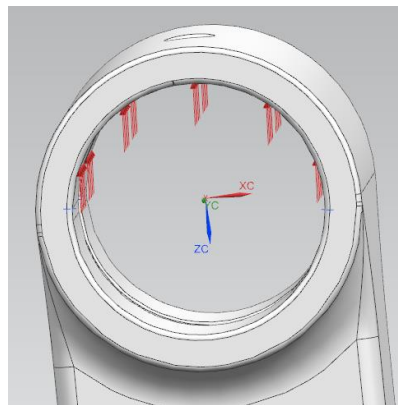


Ilustración AII - 5.7: Fuerza de fricción camisa-émbolo en el caso 3.

### AII - 5.3.4. Fuerza inercial alternativa

En el tercer caso de estudio, cuando el cigüeñal ha girado  $21,53^\circ$ , la aceleración tiene sentido hacia el pistón (hacia arriba), por lo tanto la fuerza inercial en este punto tendrá sentido contrario, tomando el mismo que la fuerza de fricción entre la camisa y el émbolo (*il. 5.7*).

$$\begin{aligned} F_{a,3} &= m_a \cdot r\omega^2 (\cos \theta + \lambda \cdot \cos 2\theta) \\ &= 1,17 \cdot 0,043 \cdot 366,5^2 \cdot (\cos(21,53^\circ) + 0,269 \cdot \cos(2 \cdot 21,53^\circ)) \\ &\cong 7614 \text{ N} \end{aligned}$$

Como anteriormente debe considerarse, como se ha expuesto en las hipótesis que a la biela solo le afectará la componente axial de dicha fuerza, quedando esta aumentada:

$$F_{a,3,axial} \cong \frac{7614 \text{ N}}{\cos(5,66^\circ)} = 7651 \text{ N}$$

Dicha fuerza inercial se verá aplicada, como la fuerza de fricción citada, en la misma zona de la superficie interna del agujero que aloja el bulón.

## AII - 6. Restricciones

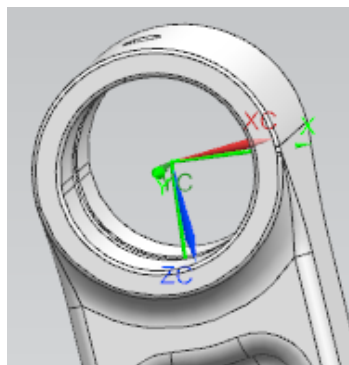
Seguidamente a aplicar las cargas que afectan a la biela, corresponde aplicar las restricciones de la misma. Tal y como se ha expuesto anteriormente, el movimiento de la biela es una composición entre movimiento alternativo lineal y movimiento rotativo.

El movimiento trasnacional del pie de la biela se definirá como una restricción definida por el usuario, aplicada en el nodo central (unido mediante un enlace RBE a todos los nodos de la cara interna del agujero), siendo ésta definida como:

Grados de libertad pie	X	Y	Z
Traslación	0	0	libre
Rotación	0	libre	0

**Tabla AII - 6.1: Grados de libertad en el pie.**

Cabe mencionar que el sistema de coordenadas utilizado se encuentra fijo con la geometría, por lo tanto es no inercial. Este hecho genera que no puedan las direcciones del sistema no correspondan con la dirección de movimiento del embolo. Para solucionar este problema, como se aprecia en la *il. 6.1*, se genera un nuevo sistema (en verde en la imagen) girando  $5,66^\circ$  el sistema original respecto el eje Y.



**Ilustración AII - 6.1: Sistema de coordenadas alternativo.**

Con este nuevo sistema de coordenadas, y únicamente para el tercer caso, se aplicaran los siguientes grados de libertad:

Grados de libertad pie (caso 3)	$X'$	$Y'$	$Z'$
Traslación	0	0	libre
Rotación	0	libre	0

**Tabla AII - 6.2: Grados de libertad en el pie (caso 3).**

Seguidamente, queda restringir el extremo de la cabeza de la biela. Para ello, se aplica de un modo semejante una restricción personalizada sobre el nodo ficticio central. Esta restricción debería permitir el desplazamiento en dirección axial y cortante, aun así, para poder lanzar la simulación es necesario que todas las direcciones con carga alguna se encuentren restringidas en algún punto. Por este motivo se aplica una restricción con los tres grados de traslación fijos, convirtiendo el nodo de aplicación en el punto fijo a la bancada virtual, donde aparecerán las fuerzas de reacción externas.

Grados de libertad cabeza	$X$	$Y$	$Z$
Traslación	0	0	0
Rotación	0	libre	0

**Tabla AII - 6.3: Grados de libertad en la cabeza.**

Finalmente, con todas las cargas y restricciones aplicadas, se puede proceder a lanzar la simulación, seguido de analizar y exponer los resultados obtenidos.



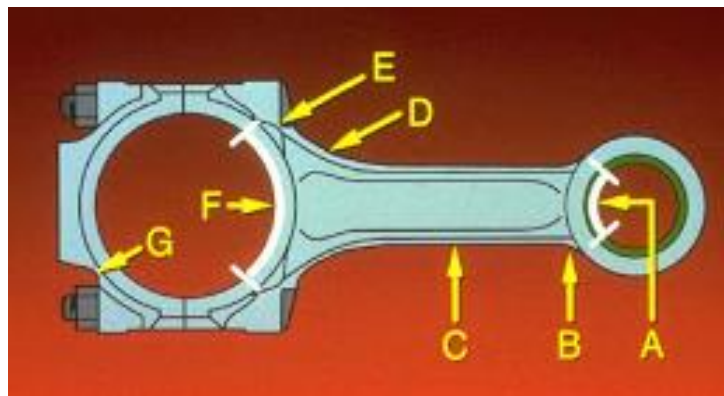
## AII - 7. Resultados

### AII - 7.1. Predicción

Previamente a obtener los resultados, es conveniente realizar un breve trabajo de predicción y anticipación. Es interesante adelantarse a los resultados para poder después comprobar con más seguridad la precisión de los mismos.

En bielas comunes, los puntos de máximo estrés tensional suelen ser los puntos de falla cuando una biela rompe, dichos puntos son actualmente conocidos y se localizan en las siguientes zonas (CATerpillar 2012):

- A. Los 120° inferiores del ojo de biela donde el pistón hace fuerza a través del pasador.
- B. La unión entre vástago y ojo de biela.
- C. En medio del vástago donde las fuerzas de pandeo son las más elevadas.
- D. La unión entre vástago y agujero para el cigüeñal.
- E. Los filetes próximos al asiento de la cabeza del perno.
- F. Los 120° superiores del agujero para el cigüeñal, donde el pistón aplica al muñón del cigüeñal las cargas de la compresión y la ignición.
- G. Los filetes próximos a los asientos de las tuercas.



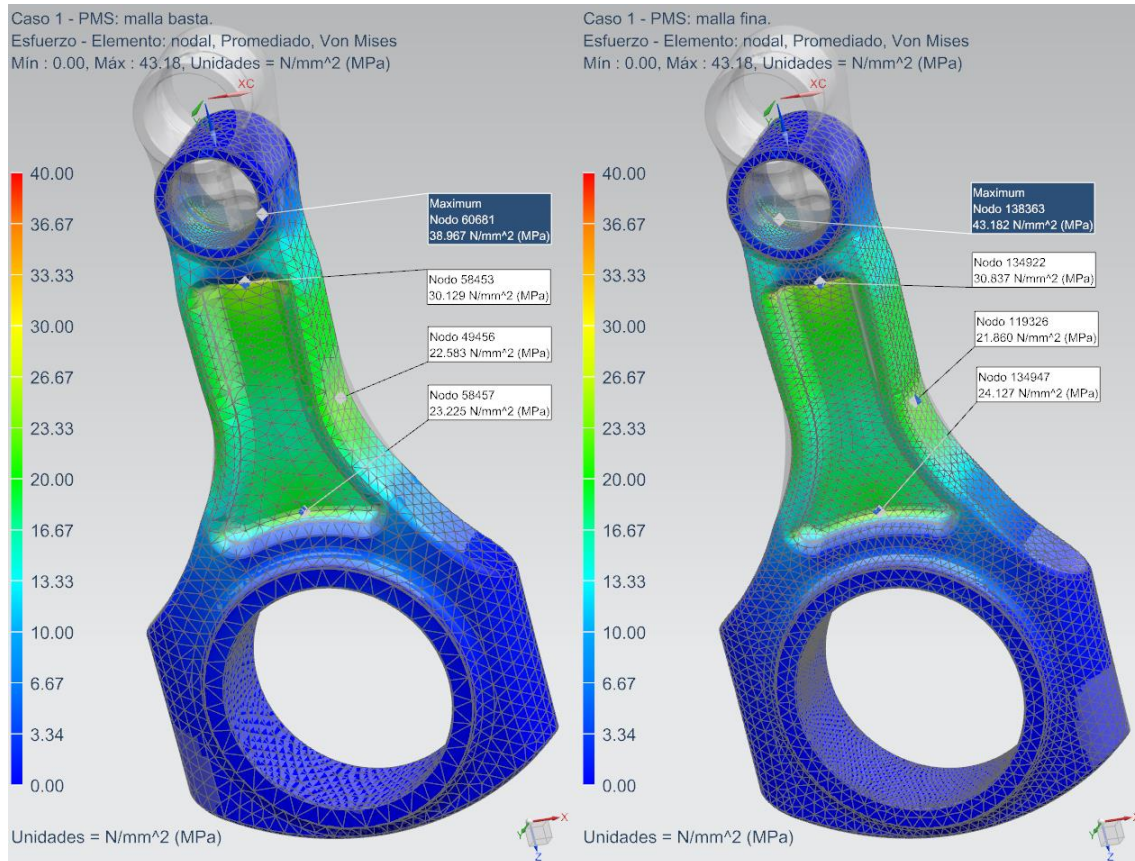
**Ilustración AII - 7.1: Puntos de falla comunes. Fuente: CATerpillar.**

Conocida esta predicción, se esperan las tensiones máximas en una de las siete zonas citadas anteriormente. Cabe mencionar que las zonas 'E' y 'G' no generarán resultados de tensiones elevadas, dado que, como se ha comentado en las hipótesis, los pernos no han sido implementados en el presente proyecto.

Finalmente, se procede a analizar los resultados de las simulaciones, atendiendo a las tensiones de Von Mises, que contemplan las tensiones en todas las direcciones. A pesar de analizar tales tensiones, se conoce que las bielas trabajan bajo cargas de tracción en el tiempo de admisión del motor, y a compresión en los demás tiempos.

## AII - 7.2. Caso 1 - PMS

Una vez simulado el primer caso, que representa la situación en que el pistón se encuentra en el PMS, se analizan los resultados generados. Se compara la simulación realizada con la malla basta inicial y la simulación con la malla afinada.



**Ilustración AII - 7.2: Resultados de tensión en el caso 1.**

Tal y como puede observarse en la *il. 7.2*, el mapa tensional de la biela en ambos casos es semejante y corresponde en cierto grado con el esperado. A continuación, se exponen los resultados (*tabla. 7.1*) según zona y malla utilizada. Dada la calidad de la malla, se consideran los resultados obtenidos de la segunda malla más precisos.

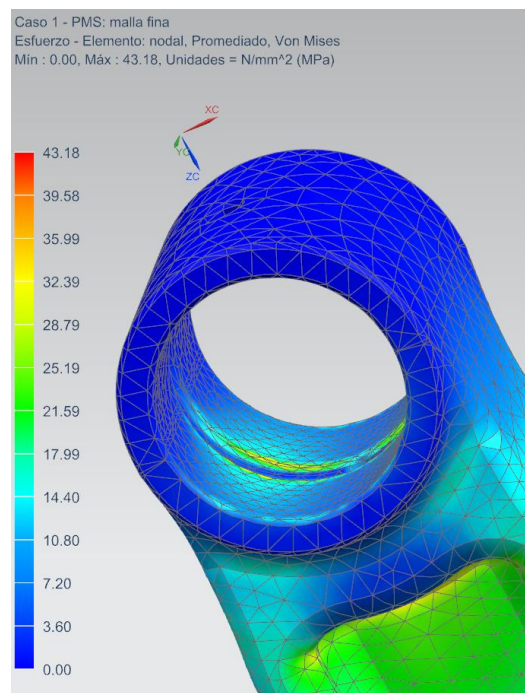
Zona / Punto	Malla basta: tensión Von Mises [MPa]	Malla fina: tensión Von Mises [MPa]
B	30,1	30,8
C	22,6	21,9
D	23,2	24,1
Máx. tensión nodal (zona A)	39,0	43,2

**Tabla AII - 7.1: Resultados de tensión en el caso 1.**

Como puede apreciarse en la *tabla 7.1*, las tensiones son semejantes en las zonas 'B', 'C' y 'D'. Asimismo, la máxima tensión nodal se localiza aproximadamente en la misma zona en ambas simulaciones, correspondiente con la zona 'A'.

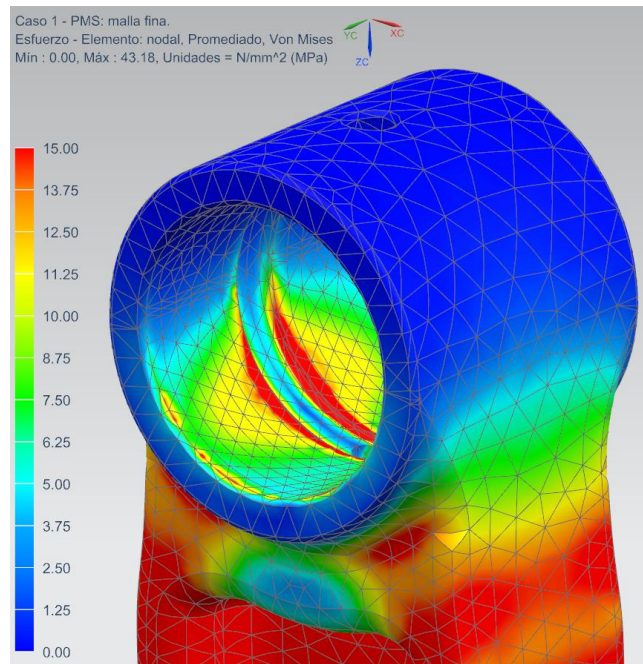
Dadas las aproximaciones realizadas y las hipótesis aplicadas, se consideran los agujeros del pie y la cabeza como las zonas que reportan resultados menos realistas. Debido a que en la realidad tales zonas contienen los puntos de contacto entre elementos móviles, los resultados locales no pueden ser considerados precisos. Este hecho constata que las fricciones son interacciones difíciles de cuantificar y definir en toda simulación mecánica.

Asimismo, observando el detalle de los resultados del pie de la biela obtenidos con la malla fina (*il. 7.3*), se puede apreciar como esta distribuye mejor las tensiones en la zona interna del agujero, centrándolas en los 120º inferiores.



**Ilustración AII - 7.3: Detalle del pie, caso 1, malla fina.**

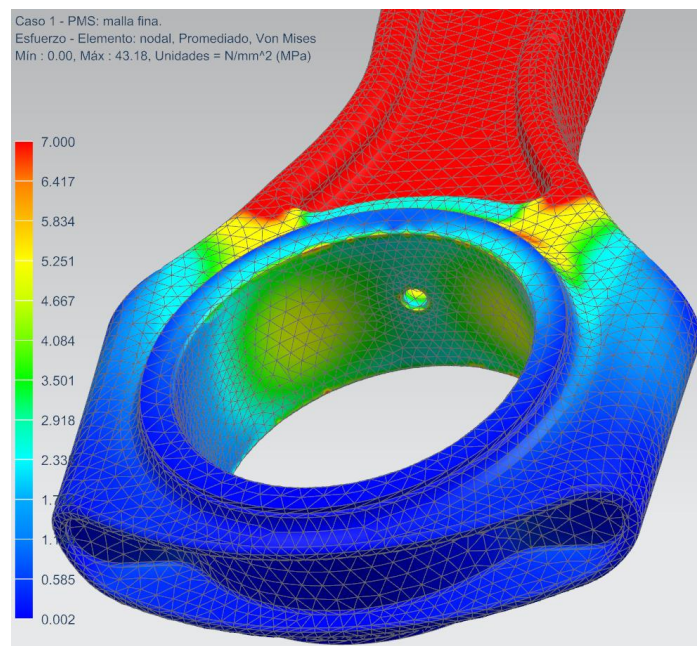
Puede verse también en la *il.7.3* como la escala no permite apreciar con claridad esta distribución de presiones, por tal de poder visualizar mejor, se satura la escala de colores a 15MPa, obteniendo la siguiente imagen:



**Ilustración AII - 7.4: Detalle del pie, caso 1, malla fina, escala saturada.**

Con este cambio de escala realizado, puede apreciarse (*il. 7.4*) con claridad como las tensiones se acumulan en la zona 'A' descrita en las predicciones, con un valor de tensión Von Mises promedio cercano a los 10 MPa.

De un modo semejante, atendiendo al detalle de la zona interna del agujero de cabeza de la biela (*il. 7.5*), se denota que la zona 'F' también sufre cierta acumulación de tensiones en los 120° correspondientes.



**Ilustración AII - 7.5: Detalle de la cabeza, caso 1, malla fina, escala saturada.**



Saturando la escala de color en 7MPa, se puede observar (*il. 7.5*) como la zona 'F' se encuentra tensionada (Von Mises) con cerca de 5MPa, tal y como se predijo, en los 120º superiores del agujero de la cabeza. Asimismo, en esta imagen se denotan también perfectamente las tensiones elevadas en la zona 'D', correspondiente a la zona de unión entre la cabeza y el cuerpo de la biela.

### AII - 7.3. Caso 2 – PMI

Seguidamente, una vez simulado el segundo caso que representa la situación en que el pistón se encuentra en el PMI, se analizan los resultados generados. Se compara la simulación realizada con la malla basta inicial y la simulación con la malla afinada.

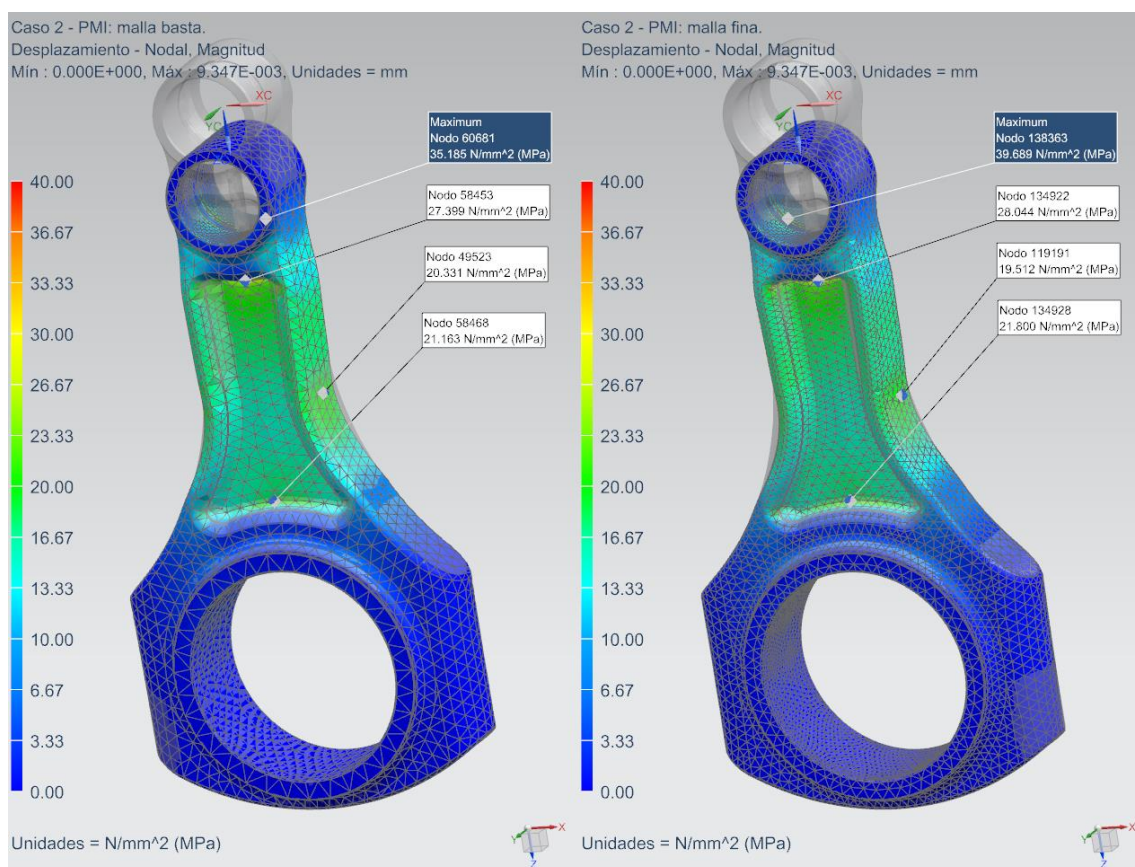


Ilustración AII - 7.6: Resultados de tensión en el caso 2.

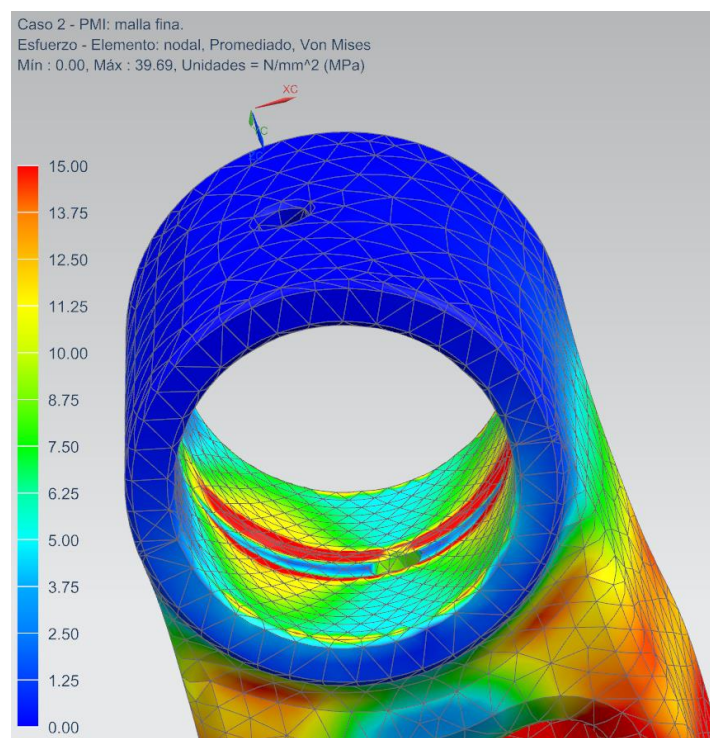
De un modo semejante al primer caso, se observa en la *il. 7.6* que el mapa tensional de la biela en ambos casos es semejante y corresponde en cierto grado con el esperado. A continuación, se exponen los resultados (*tabla 7.2*) según zona y malla utilizada en cada simulación.

Zona / Punto	Malla basta: tensión Von Mises [MPa]	Malla fina: tensión Von Mises [MPa]
B	27,4	28,0
C	20,3	19,5
D	21,1	21,8
Máx. tensión nodal (zona A)	35,2	39,7

**Tabla AII - 7.2: Resultados de tensión en el caso 2.**

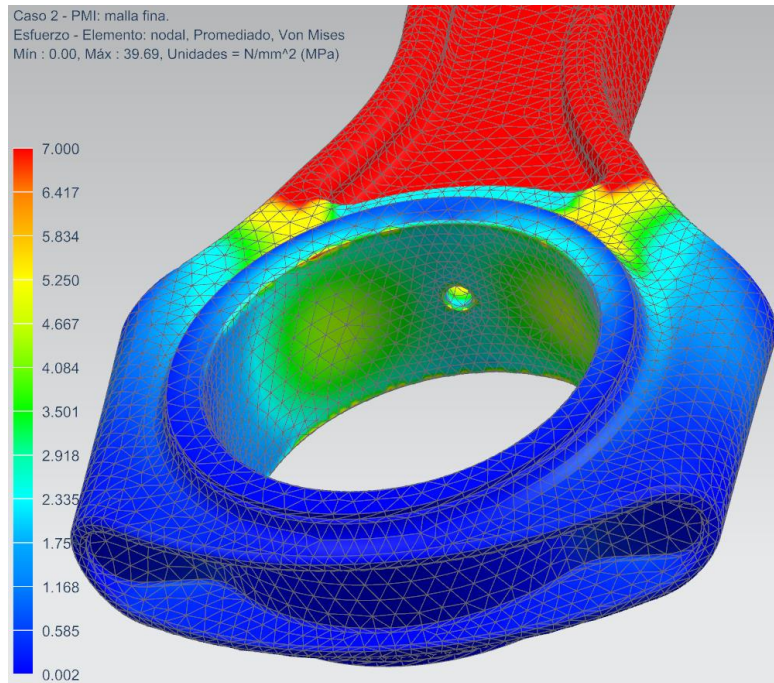
Como puede apreciarse en la *tabla 7.2*, las tensiones son muy semejantes en las zonas 'B', 'C' y 'D'. Asimismo, la máxima tensión nodal se localiza aproximadamente en la misma zona en ambas simulaciones, correspondiente con la zona 'A'. Igual que en el caso anterior, esta tensión debe ser cuestionada por encontrarse en una zona afectada por varias hipótesis de simplificación. Como en el caso anterior, se consideran los resultados obtenidos de la segunda malla más precisos, a pesar de que ambas devuelven resultados semejantes y del mismo orden de magnitud.

En este caso, sucede también que las zonas 'A' y 'F' se encuentran tensionadas según las predicciones, pero debe cambiarse la escala para poder apreciarlo. A continuación se exponen los detalles del pie y la cabeza con las escalas de colores saturadas:



**Ilustración AII - 7.7: Detalle del pie, caso 2, malla fina, escala saturada.**

Como puede apreciarse (*il. 7.7*) saturando la escala de colores en el pie, las tensiones se acumulan en la zona 'A' descrita en las predicciones, con un valor de tensión Von Mises promedio cercano a los 9 MPa. Además, se observa con claridad la acumulación de tensión en la zona 'B', correspondiente con la unión entre pie y cuerpo de la biela.

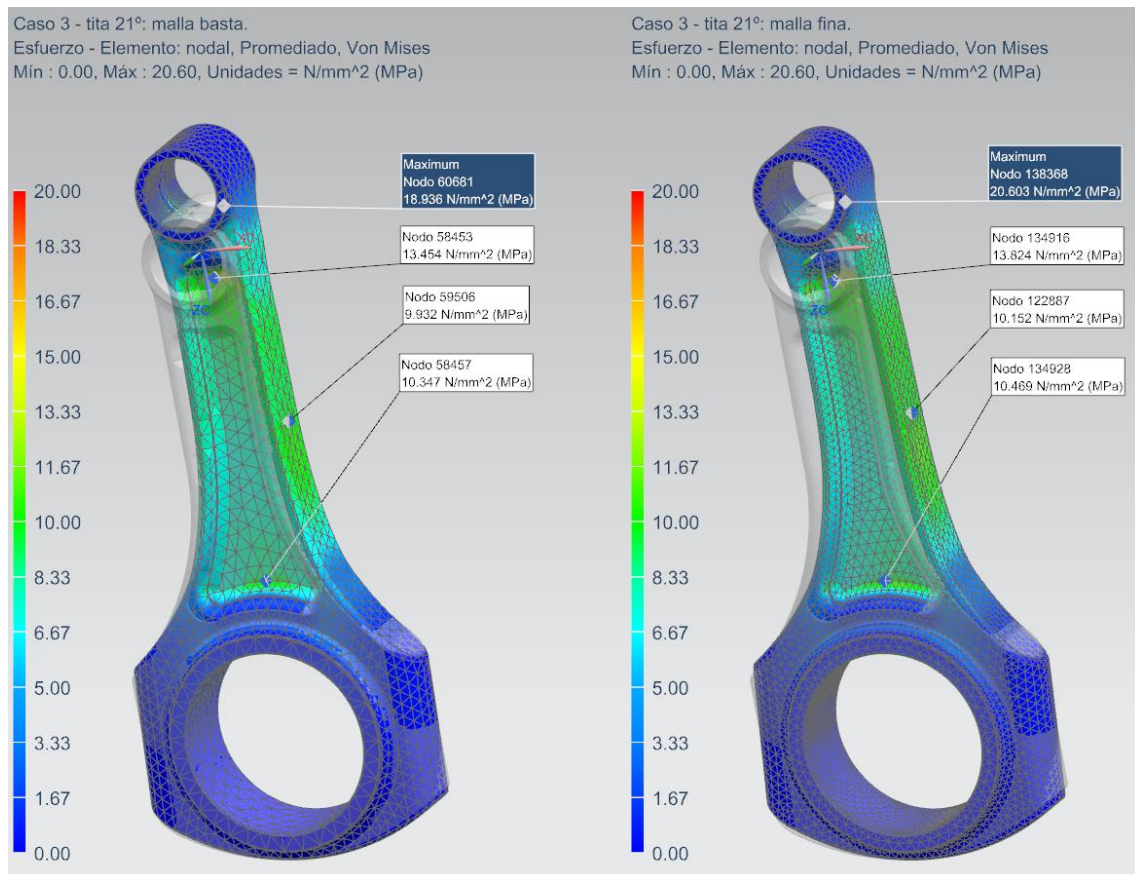


**Ilustración AII - 7.8: Detalle de la cabeza, caso 2, malla fina, escala saturada.**

De un modo semejante al primer caso, en esta situación de carga también se observa (*il. 7.8*) una tensión distribuida en los 120° cercanos al cuerpo de la biela, esta vez con una tensión de Von Mises cercana a 4MPa. También destaca en esta imagen la elevada tensión en la zona 'D', dónde se une la cabeza con el cuerpo de la biela.

### AII - 7.4. Caso 3 - $\theta=21.53^\circ$

Finalmente, se realiza el trabajo sobre el tercer caso. Este representa la situación en que el cigüeñal ha girado  $21,53^\circ$ , situación en que la aceleración del émbolo pasa por un máximo local. Se analizan los resultados generados comparando la simulación realizada con la malla basta inicial y la simulación con la malla afinada.



**Ilustración AII - 7.9: Resultados de tensión en el caso 3.**

Tal y como se ha puntualizado en los casos anteriores, se observa en la *il. 7.9* que el mapa tensional de la biela en ambos casos es semejante y corresponde en cierto grado con el esperado.



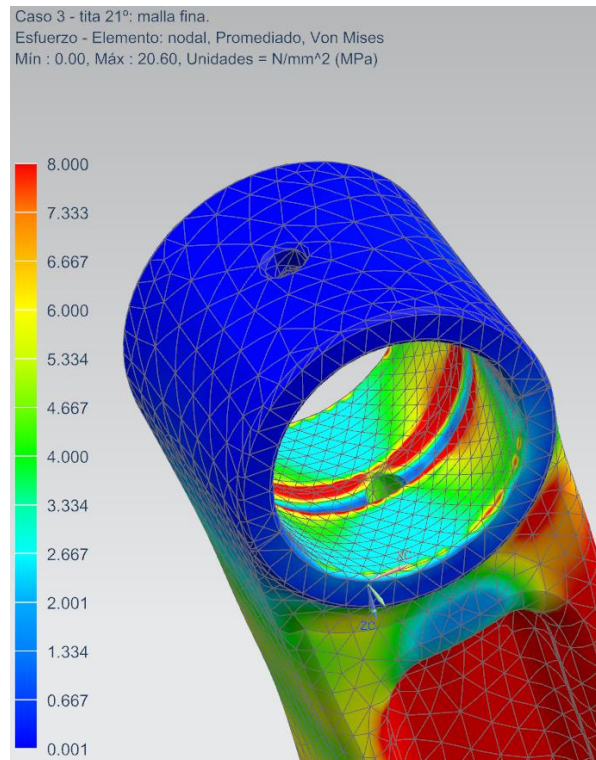
A continuación, se exponen los resultados (*tabla. 7.3*) según zona y malla utilizada en cada simulación:

Zona / Punto	Malla basta: tensión Von Mises [MPa]	Malla fina: tensión Von Mises [MPa]
B	13,5	13,8
C	9,9	10,2
D	10,3	10,5
Máx. tensión nodal (zona A)	18,9	20,6

**Tabla AII - 7.3: Resultados de tensión en el caso 3.**

De nuevo, puede apreciarse en la *tabla 7.3* que las tensiones son muy semejantes en las zonas 'B', 'C' y 'D'. Así como la máxima tensión, localizada aproximadamente en la misma zona en ambas simulaciones, correspondiente con la zona 'A'. Como en los casos anteriores, las tensiones máximas deben ser objeto de duda y no deben considerarse resultados precisos.

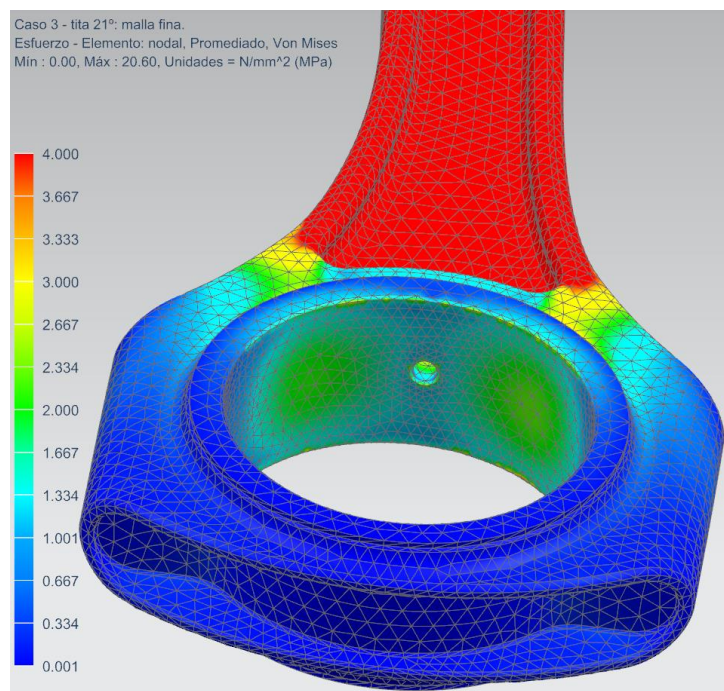
A continuación se describe una vista de detalle del interior del agujero del pie, donde se localiza la máxima tensión.



**Ilustración AII - 7.10: Detalle del pie, caso 3, malla fina, escala saturada.**

En la *il. 7.10* puede apreciarse como saturando la escala de color en 8 MPa, se aprecia con claridad la situación de tensionado interna del agujero del pie, correspondiente con la zona 'A'. De un modo semejante a los casos anteriores, la tensión de Von Mises se centra en los 120º cercanos a la dirección de las fuerzas axiales, esta vez resultando un valor medio cercano a los 4 MPa.

Sucede el mismo fenómeno en la zona interna de la cabeza de la biela, como se puede apreciar a continuación:



**Ilustración AII - 7.11: Detalle de la cabeza, caso 3, malla fina, escala saturada.**

Efectivamente, se aprecia en la *il. 7.11* como en la zona de tensión 'F' resulta una tensión media de Von Mises cercana a los 2 MPa.

## AII - 8. Conclusión

Después de haber realizado las seis simulaciones expuestas, se procede a la exposición de las conclusiones obtenidas. En primera instancia, cabe remarcar que parece haber una clara convergencia de los resultados, dado que la malla basta reporta resultados muy similares a los obtenidos con la malla más fina. Por este motivo, las siguientes conjeturas se realizarán únicamente a partir de la malla más fina.

Resulta interesante realizar una breve comparación de los tiempos necesarios para el cálculo de las diferentes mallas. Atendiendo a los archivos *.log* reportados de las simulaciones, se realiza la siguiente tabla comparativa:

Simulación	Malla basta [seg.]	Malla fina [seg.]
Caso 1	21	152
Caso 2	24	159
Caso 3	41	249

**Tabla AII - 8.1: Tiempos invertidos en las simulaciones.**

La *tabla 8.1* representa los tiempos invertidos de simulación invertidos en cada caso. Tales valores no corresponden con el proceso completo de simulación, sino que identifican únicamente el tiempo invertido en el cálculo de las iteraciones, una vez el código se encuentra escrito por el programa. Como se aprecia, las simulaciones del tercer caso requieren más tiempo, aproximadamente el doble. Aun así, se están analizando valores de orden de magnitud reducido tratándose de una simulación de elementos finitos. Estos valores son cercanos a medio minuto para la malla basta y tres minutos y medio para la malla fina. Tales tiempos se consideran muy cortos en comparación con simulaciones habituales en análisis mecánicos de componentes, que alcanzan fácilmente varias horas de duración.

Seguidamente se procede a resumir todos los datos obtenidos de las simulaciones con la malla fina, resultando la tabla siguiente:

Tensiones [MPa]	Caso 1 - PMS	Caso 2 - PMI	Caso 3 – tita 21º
Tensión zona 'A'	10	9	4
Tensión zona 'B'	31	28	14
Tensión zona 'C'	22	20	10
Tensión zona 'D'	24	22	11
Tensión zona 'F'	5	4	2

**Tabla AII - 8.2: Resultados con malla fina.**

Como se expone en el estudio de la biela, el acero resiste hasta 700 MPa a tracción, como se aprecia en la *tabla 8.2*, las tensiones están muy lejos de este valor. A pesar de tal diferencia, en el dimensionado de bielas se debe tener muy en cuenta la fatiga del componente, que resulta ser habitualmente la causa de rotura de las mismas. Considerando un ritmo de giro del cigüeñal de 2000 rpm, a dos ciclos por vuelta realizada, la biela realiza 4000 ciclos de carga completos. Asimismo, para realizar un estudio más exhaustivo y preciso, debería analizarse la fatiga de la biela, puesto que esta es más crítica que la tensión máxima en un estado de carga puntual.

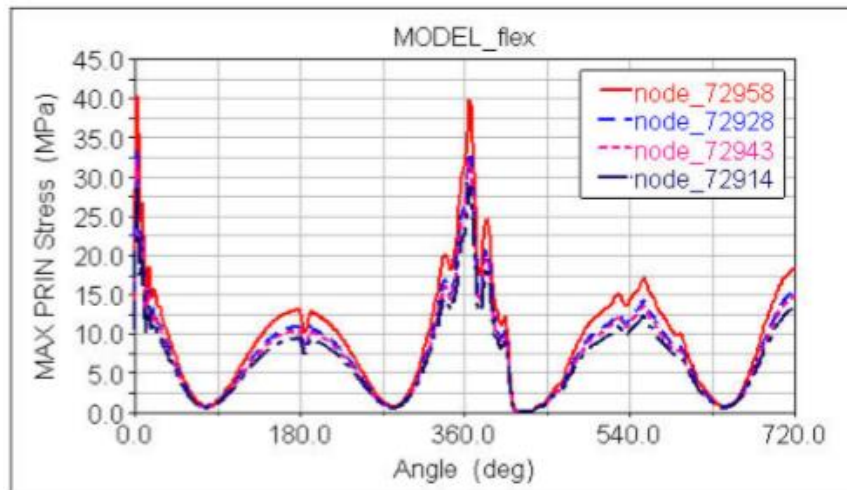
Tal y como puede ser también observado en la *tabla 8.2*, las tensiones máximas nodales no han sido representadas. Este hecho se debe a que se localizan en la superficie interior del pie de la biela. En tal zona se han realizado varias hipótesis, principalmente para poder simular sin necesidad de contactos. Por este motivo, las tensiones locales máximas no son consideradas de utilidad para realizar las conclusiones finales, pero sí las tensiones medias en las zonas determinadas.

Debe tenerse en cuenta para analizar los resultados la unificación del modelo en un solo cuerpo sólido, permitiendo simular sin necesidad de aplicar contactos. Asimismo, aceptar y utilizar tal hipótesis desencadena que no se detecten tensiones remarcables en las zonas 'E' y 'G'. De todos modos, esta simplificación lleva la simulación a una zona más conservadora: debido a que los pernos trabajan comprimiendo la biela, se reduce el estado tensional de dichas zonas, en comparación con los resultados obtenidos mediante unificación de las partes.

Seguidamente, dado que se está simulando un problema elevadamente dinámico mediante una simulación estática, deben poderse validar o contrastar los resultados obtenidos. Esta acción es necesaria para poder edificar las conclusiones sobre una base razonablemente sólida. En caso de no poder contrastarse, se podría estar cayendo en el error de generar conclusiones especulativas, desde unos resultados engañosos.

Por tal de contrastar los resultados, se acude al estudio realizado por *Zhou Qinghui, Wang Yunying y Ji Wei*, publicado en 2010 en la *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. En dicho estudio se realiza un análisis de simulación sobre las tensiones generadas en un sistema cigüeñal-biela-pistón completo. Se centra en el estudio de la biela de un motor diésel, trabajando en un régimen constante de 2000 revoluciones por minuto. Como se aprecia, las condiciones de trabajo no son iguales, pero puede utilizarse dicho estudio para comprobar el orden de magnitud de los resultados. En dicho artículo se concluye que la tensión de Von Mises máxima en la biela es de 34 MPa (*Zhou, Wang y Ji 2010*).

Tomándose este valor como referencia de una simulación más realista, se concluye que las hipótesis realizadas, y por ende los resultados obtenidos de la simulación, son razonablemente aceptables y creíbles. En el presente estudio se ha obtenido unos resultados semejantes en cuanto a orden de magnitud se refiere, decenas de mega pascles. El proyecto de Zhou, Wang y Ji contempla todo el rango de movimiento del cigüeñal y las diferentes posiciones de la biela. Los resultados obtenidos son representados mediante la siguiente gráfica:



**Ilustración AII - 8.1: Tensión de Von Mises según ángulo girado. Fuente Zhou, Wnag y Ji.**

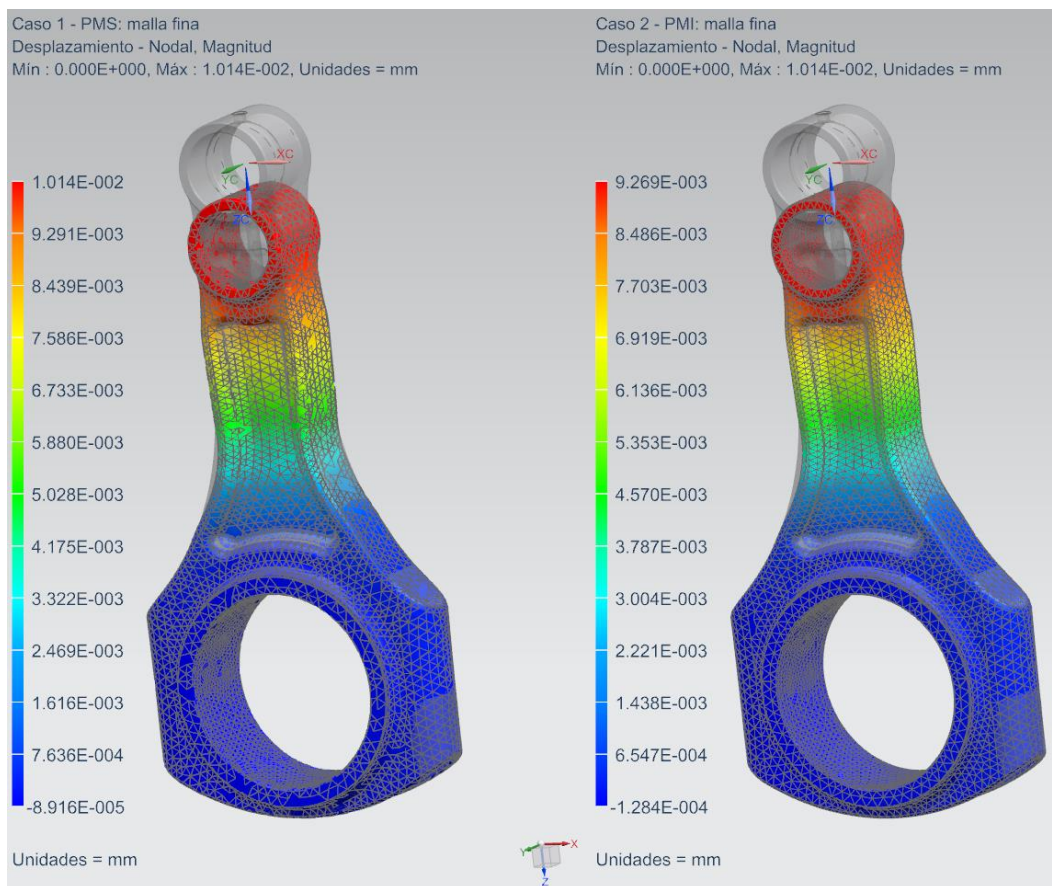
En la *il. 8.1* se aprecia como las tensiones de Von Mises máximas se generan cuando el pistón se encuentra en el PMS. También se encuentra un máximo local cuando el pistón pasa por el PMI. Cabe destacar que el diagrama identifica la tensión de Von Mises para cuatro nodos diferentes, a pesar de estar los ejes incorrectamente identificados, puesto que dicen representar la máxima tensión principal.

Parte de los objetivos del presente proyecto eran conseguir coincidencias en el orden de magnitud de los resultados, la comparación de estos con el artículo citado corrobora esta esperanza y otorga cierta solidez técnica a los valores obtenidos.

Así como la comparación citada, también dota de solidez técnica el hecho de que las predicciones inicialmente expuestas se hayan cumplido en cierta medida. Tal y como se predice en el apartado 7.1, las tensiones locales máximas han sido localizadas en las zonas 'A', 'B', 'C', 'D' y 'F'. Cabe destacar especialmente las zonas 'B', 'C' y 'D', las cuales se diferencian por reportar las tensiones medias más elevadas.

En cuanto a los tres casos diferenciados, en todos ellos se aprecia una clara simetría respecto el plano XZ, puesto que la biela es simétrica y las fuerzas aplicadas en la dirección transversal son solo efecto de los momentos de fricción, de un valor muy reducido. Asimismo, despreciando el efecto de dichos momentos, cabe mencionar que la biela se encuentra únicamente sometida a esfuerzos axiales (dirección Z) dado que es un elemento biarticulado con dos rótulas en sus extremos.

En las imágenes que muestran los resultados (*il. 8.2 y 8.3*) se aprecia (atendiendo a la figura translúcida del modelo no deformado) como en los dos primeros casos la biela trabaja a compresión. En cambio, en el tercer caso, la biela se encuentra sometida a esfuerzos de tracción. Este resultado concuerda con los esperados, dado que, como se ha expuesto en anteriormente, la biela trabaja normalmente a compresión, excepto en la carrera de admisión (tercer caso).

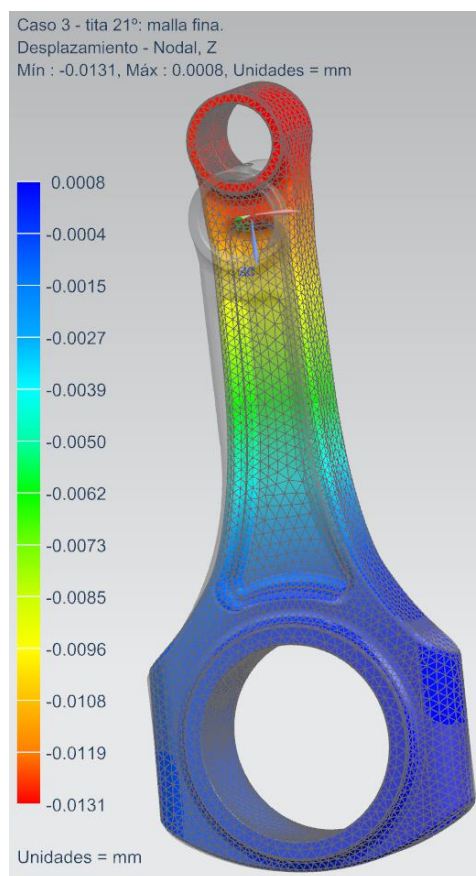


**Ilustración AII - 8.2: Deformación axial en primer y segundo caso.**



Como se corrobora con la simulación, que la biela trabaja bajo efectos de compresión en los dos primeros casos (correspondientes al PMS y PMI). La magnitud de los desplazamientos máximos es del orden de diez micras, siendo levemente mayor en el primer caso. Asimismo, se considera oportuno comentar que las deformaciones representadas no se encuentran a escala real, sino que son aumentadas en el gráfico para poder ser apreciadas con más claridad.

Se analizan también los desplazamientos obtenidos en el tercer caso, que corresponde con el estudio de una posición concreta durante el ciclo de admisión de mezcla:



**Ilustración AII - 8.3: Deformación axial en el tercer caso.**

Atendiendo al gráfico obtenido de la tercera simulación (*il. 8.3*), resulta que las deformaciones parecen muy semejantes en valor absoluto, estando también alrededor de las diez micras. En cambio, en este caso, estando la biela sometida a tracción, esta tiende a alargarse. Por este motivo aparecen los desplazamientos en negativo.

Si bien un incremento o decremento de diez micras sobre la longitud de la biela no es un grave problema para un motor de combustión, si puede llegar a serlo la variación de diámetro en los agujeros del pie y la cabeza. Como se ha comentado anteriormente, estas zonas presuntamente no devuelven resultados precisos, por lo que no se estudiarán tales deformaciones en los diámetros. Un apriete de los mismos podría suponer un grave aumento de la fricción con el cojinete, del mismo modo que un aumento del diámetro podría generar fallas causadas por vibraciones.

En conclusión, se cree razonable tomar estas simulaciones como punto base sólido para futuras simulaciones más exhaustivas, con modos de cálculo dinámicos y no lineales. Asimismo, se corrobora que *NX Samcef* parece ser un módulo de cálculo válido para simulaciones lineales, estáticas.





**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

---

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

# **Estudio mecánico de un componente de automoción utilizando herramientas de simulación numérica**

**EMSN.001**

---

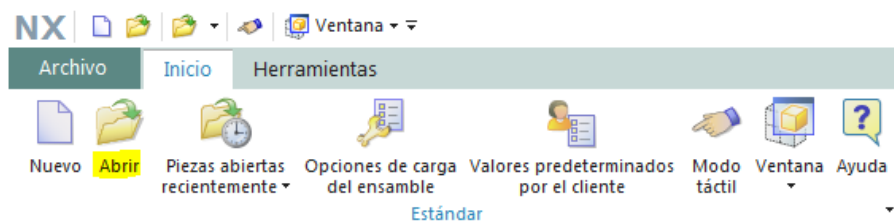
## **ANEXO III - Tutorial de realización test NAFEMS LE2**

## AIII - 1. Introducción

Dadas las características de este caso en concreto, se ha considerado realizar un tutorial guiado para la realización del siguiente benchmark. Se pretende ilustrar así los menús y funcionalidades del entorno Siemens NX. Del mismo modo, este tutorial cierra las puertas de posibles errores causados en un futuro por una mala interpretación del presente documento.

Inicialmente, debe esculpirse la geometría mediante un programa de modelado en tres dimensiones. Siemens NX dispone de un módulo de diseño altamente potente, pero dado que este estudio pretende validar un *solver*, se guiarán únicamente las fases de pre-procesado y post-procesado. Todas las geometrías de este proyecto están diseñadas con el módulo de modelado de Siemens NX10.

Una vez modelada la geometría, hay que importarla (modelos diseñados en otros programas) o simplemente abrirla. Para ello, seleccionar la opción en la pestaña [Inicio], en el cuadro de dialogo emergente, localizar el archivo de geometría y aceptar.



**Ilustración AIII - 1.1: Barra de Inicio.**

Una vez abierta la pieza, el programa posiblemente se encuentre en el modo [Modelado], para cambiar al modo de [Simulación], es necesario ir a [Inicio] y seleccionar [Simulación avanzada...]. Si esta opción no aparece, significa que el usuario se encuentra ya en el modo [Simulación].

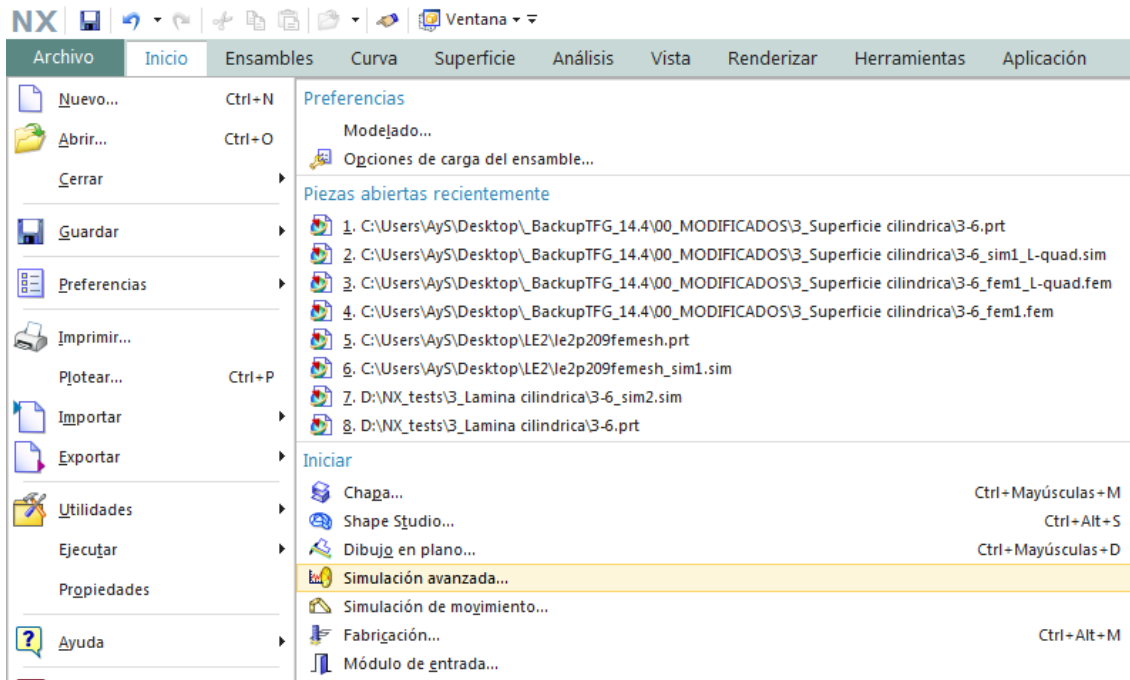


Ilustración AIII - 1.2: Menú Archivo.

## AIII - 2. Pre-procesado

Una vez activado el modo [Simulación], hay que generar los archivos *.fem* y *.sim*. En ellos se almacena la información sobre el mallado y las condiciones de contorno respectivamente. Estos archivos pueden crearse de manera independiente o a la vez. Ambas opciones desembocan en el mismo resultado. En el caso que se ocupa, se selecciona la opción [FEM y SIM nuevos].

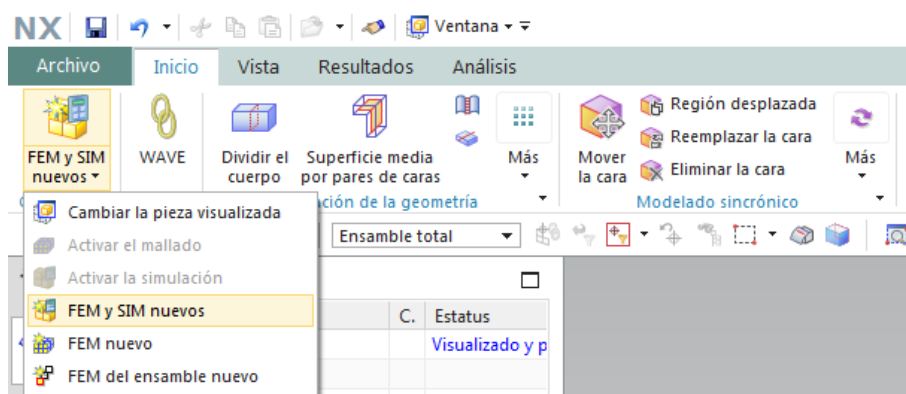
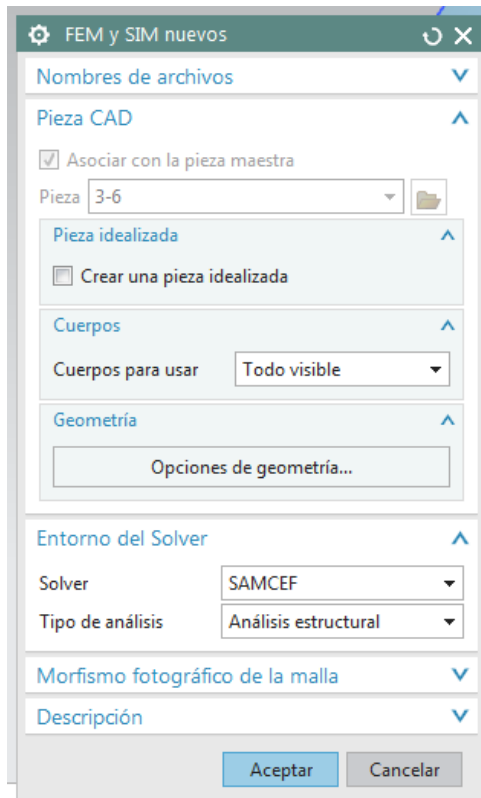


Ilustración AIII - 2.1: FEM y SIM nuevos.

Al seleccionar la opción aparece una ventana emergente con diferentes posibilidades de configuración para los archivos a crear. De ellas cabe destacar que se ha modificado únicamente las opciones relacionadas con el *solver*, que deben designar [SAMCEF] como el código a utilizar y [Análisis estructural] como el tipo de análisis.

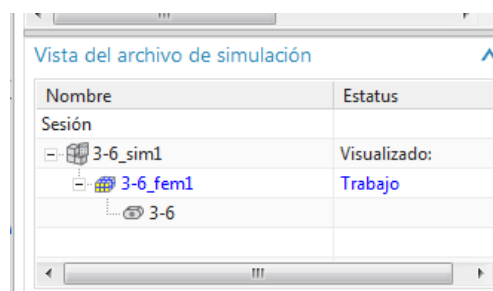


**Ilustración AIII - 2.2: FEM y SIM nuevos ventana emergente.**

Es interesante mencionar un par de opciones concretas. Si se desea simular una pieza muy compleja geométicamente, o realizar alguna modificación respecto el modelado original, se debe activar la casilla [Crear pieza idealizada], esta opción crea un modelo que podrá ser modificado y simplificado sin afectar a la pieza original.

Asimismo, hay elementos de la geometría que NX no importa por defecto, como puntos, sistemas de coordenadas, líneas, entre otros. Si se desean importar algunos de ellos, debe seleccionarse desde el cuadro emergente [Opciones de geometría...].

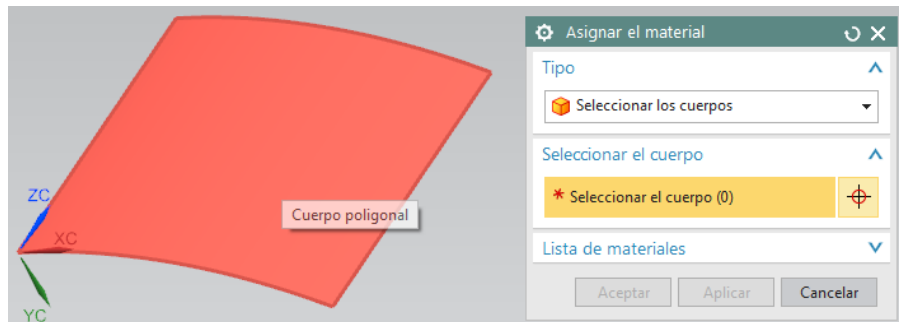
Una vez creados los archivos, cobra vital importancia el cuadro de navegación entre ellos, este aparece debajo del [Navegador de simulación], por defecto en la zona izquierda de la pantalla.



**Ilustración AIII - 2.3: Vista del archivo de simulación.**

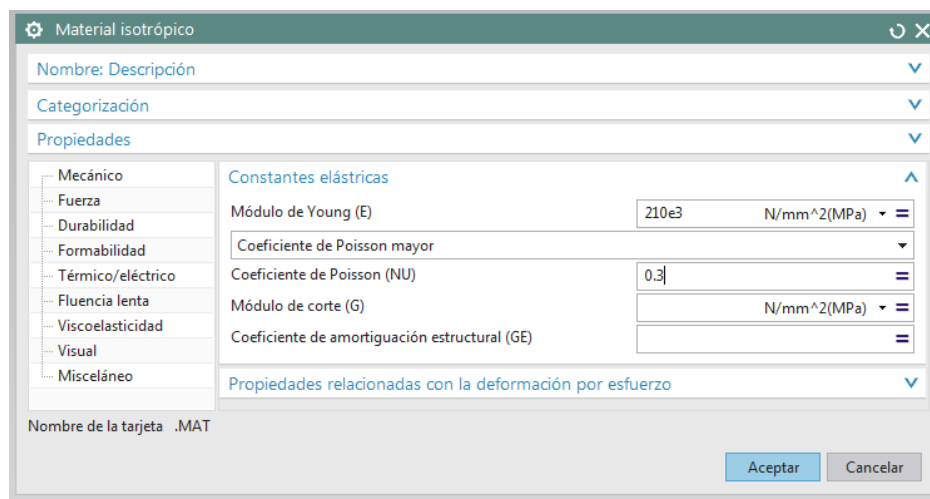
Para pasar del archivo de mallado (.FEM) al de simulación (.SIM) y viceversa, basta con hacer doble clic sobre uno de ellos. Seguidamente se procede a otorgar las propiedades del material deseado para cada cuerpo. Para ello debe seleccionarse [Asignar los materiales] en la pestaña de [Inicio]. Abriéndose así un cuadro de dialogo en el que se deben seleccionar los cuerpos a asignar y los materiales de una biblioteca.

En el caso que se ocupa, se debe crear un material nuevo con las características que marca el problema.



**Ilustración AIII - 2.4: Asignar el material.**

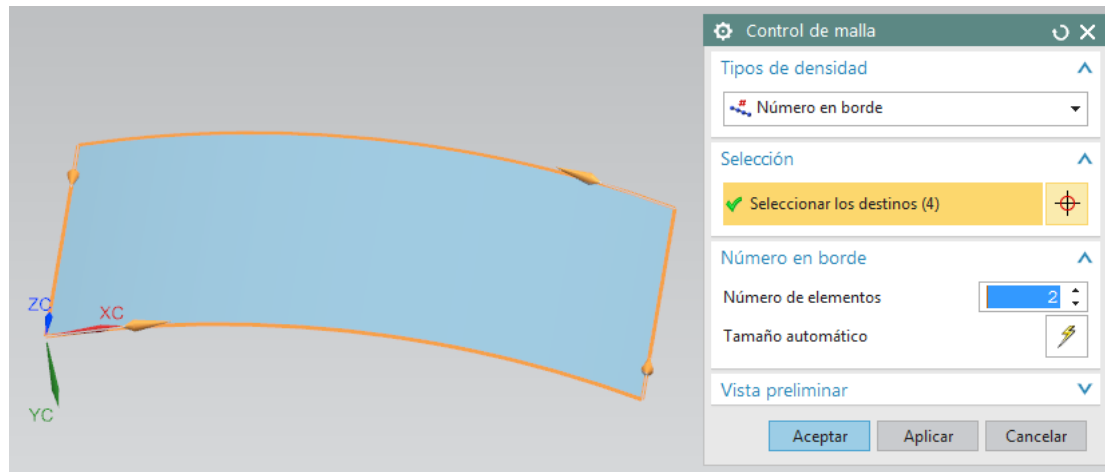
Para ello, seleccionar la opción [Crear el material] del diálogo [Material nuevo]. Es importante remarcar que para este caso, el material debe ser isótropo. Una vez seleccionada la opción de [Crear el material], aparece el cuadro de diálogo correspondiente, en el que debemos introducir las propiedades del nuevo material:



**Ilustración AIII - 2.5: Material isotrópico.**

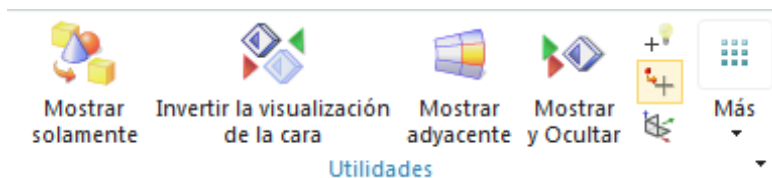
[Aceptar] para crear el nuevo material y volver al cuadro de asignación de material, seleccionar el cuerpo deseado y [Aceptar] de nuevo. Se procede a continuación al mallado del modelo, para ello, puesto que la malla está definida completamente en el enunciado del problema, hay que definir los controles de malla necesarios. En este caso se requieren dos especificaciones, una para delimitar el número de elementos por cada borde y otro es definir completamente el punto de malla E, descentrado respecto a la superficie.

Para delimitar el ńmero de elementos, debe seleccionarse la opci3n [Control de malla], en el grupo de acciones [Malla], dentro de la pestaña de [Inicio]. Como se ha definido anteriormente, se debe limitar a dos el ńmero de elementos en cada arista, para ello completar el cuadro emergente seleccionando las cuatro aristas y limitando a dos elementos por borde:



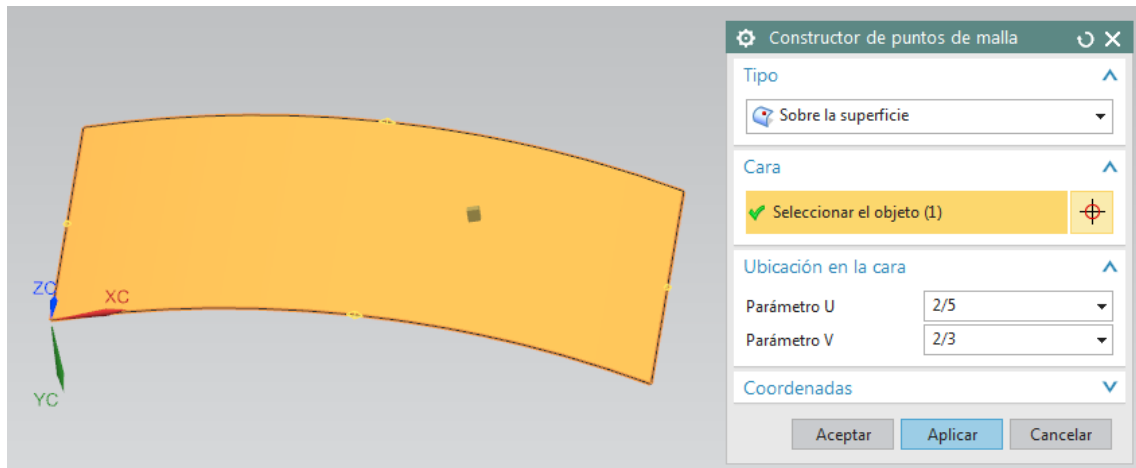
**Ilustraci3n AIII - 2.6: Control de malla.**

[Aceptar] para proceder a determinar la posici3n del nodo central E. Para ello hay que crear un punto de malla en la posici3n determinada, que ser1 tomado en cuenta por el programa mientras genere la malla. Se selecciona la opci3n [Punto de malla] en el grupo de [Utilidades], tambi3n en la pestaña de [Inicio].



**Ilustraci3n AIII - 2.7: Grupo de Utilidades.**

Una vez abierto el cuadro de di1logo del [Constructor de puntos de malla], debemos seleccionar el tipo de definici3n del punto, en este caso, [Sobre la superficie]. Una vez seleccionada esa opci3n, se permite la selecci3n de la superficie y la determinaci3n de la posici3n en funci3n de los par1metros U y V. Estas coordenadas son relativas, pueden tomar valor entre cero y uno, y serían las equivalentes a X e Y si la superficie fuera plana. Dado que el punto se encuentra a 0,2m del extremo BC, el par1metro U ser1  $2/5$ . De manera semejante, dado que se encuentra a 20° del extremo AB, el par1metro V tendr1 valor de  $20/30$ .



**Ilustración AIII - 2.8: Constructor punto de malla.**

Se procede aceptando, con lo que el punto de malla resultará creado. Finalmente, es momento de generar la malla, para ello debe seleccionarse la opción [Malla 2D] en el grupo de acciones de [Malla]. Esto abrirá un cuadro de diálogo, dicho cuadro es de vital importancia en procesos de simulación, puesto que condiciona la malla resultante. En el desplegable [Objetos para mallar] seleccionar el cuerpo cilíndrico, y en [Propiedades del elemento] seleccionar el tipo de elemento deseado, en este caso, elementos cuadriláteros lineales.

Seguidamente se procede a completar las opciones de [Parámetros de la malla], seleccionando el [Método de selección] (en el caso que se ocupa, [Subdivisión]) y el [Tamaño del elemento]. Este último campo si ha sido modificado en el mallado de este problema, para evitar la creación de elementos interiores, se ha determinado un tamaño de 200 mm, El icono del rayo que aparece a la derecha genera un tamaño de elemento automático, en función de la geometría a mallar.

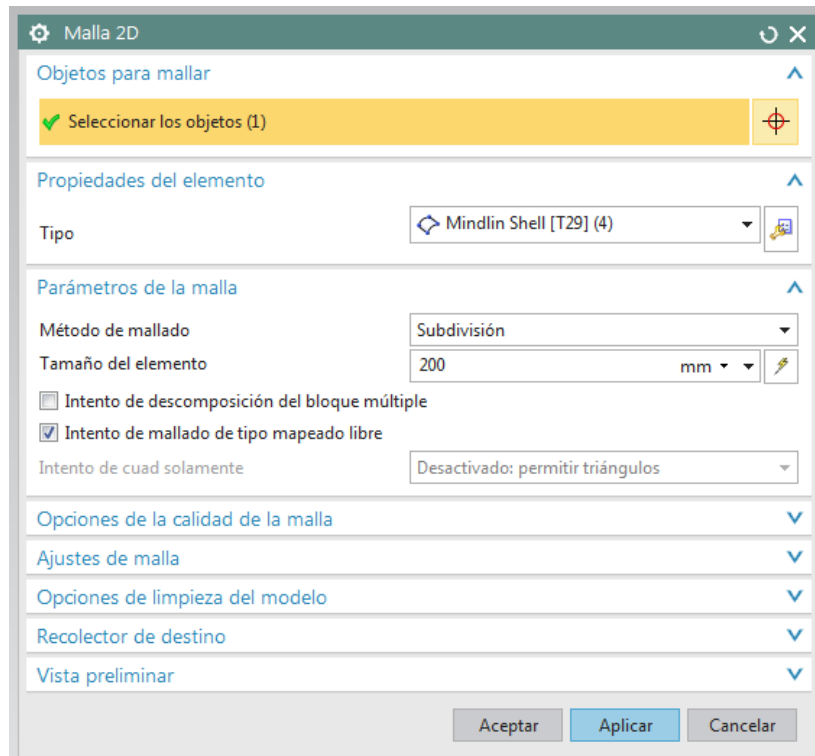


Ilustración AIII - 2.9: Malla 2D.

Para ver cómo queda la malla antes de generarla y detectar errores, como la creación de elementos internos no deseados, es útil activar la vista preliminar. De todos modos en cualquier momento se podrá modificar la malla mediante clic en el botón derecho sobre la malla (en el [Navegador de simulación]). La malla debería quedar así:

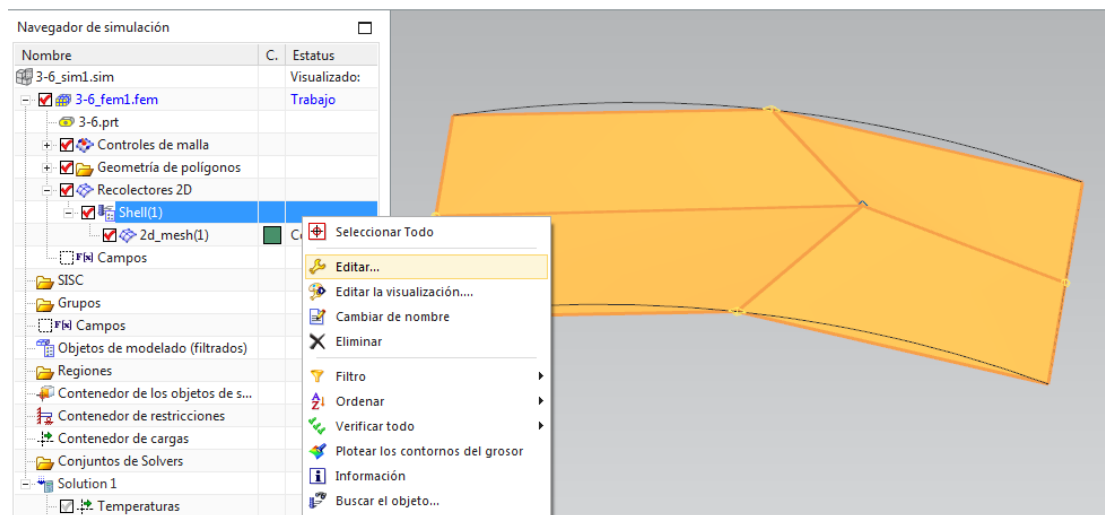
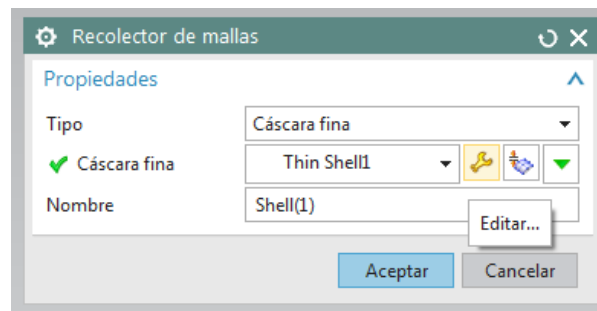


Ilustración AIII - 2.10: Edición propiedades recolector de malla.

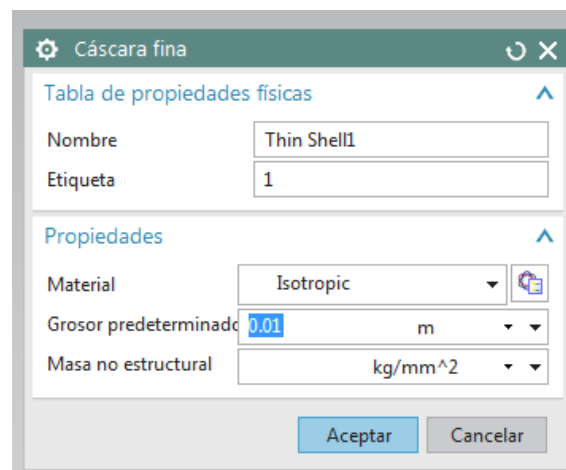


Como puede observarse en la *il. 2.10*, se ha creado un contenedor para los [Controles de malla] y otro para los [Recolectores 2D]. Los recolectores son contenedores para mallas con iguales características, así pues, pulsando botón derecho sobre ellos se pueden editar sus propiedades. Principalmente en el caso que se ocupa, es necesario otorgar un espesor a los elementos bidimensionales. Para ello se accede al cuadro de dialogo de edición de los recolectores, pulsando en [Editar] que se aprecia en la *il.2.10* y seguidamente en el botón [Editar] de la *il. 2.11*.



**Ilustración AIII - 2.11: Edición Recolector de malla, ventana emergente.**

Se entra entonces en el cuadro de edición de [Cáscara fina], en él, se debe introducir el valor de grosor determinado en el enunciado, en este caso, 0,01 m. Se pueden cambiar y añadir otras características, pero no son necesarias para esta simulación.



**Ilustración AIII - 2.12: Propiedades Cáscara fina.**

Seguidamente a definir el grosor, como se puede apreciar en la descripción del problema, debe crearse un sistema de coordenadas cilíndrico local para poder aplicar la restricción de simetría. Para crear dicho sistema, acceder al menú [Sistema de coordenadas], en el grupo de [Utilidades], situado en la pestaña de [Inicio]. Una vez seleccionada la opción, aparecerá la siguiente ventana emergente, que se debe completar como se aprecia en la *il. 2.13*.

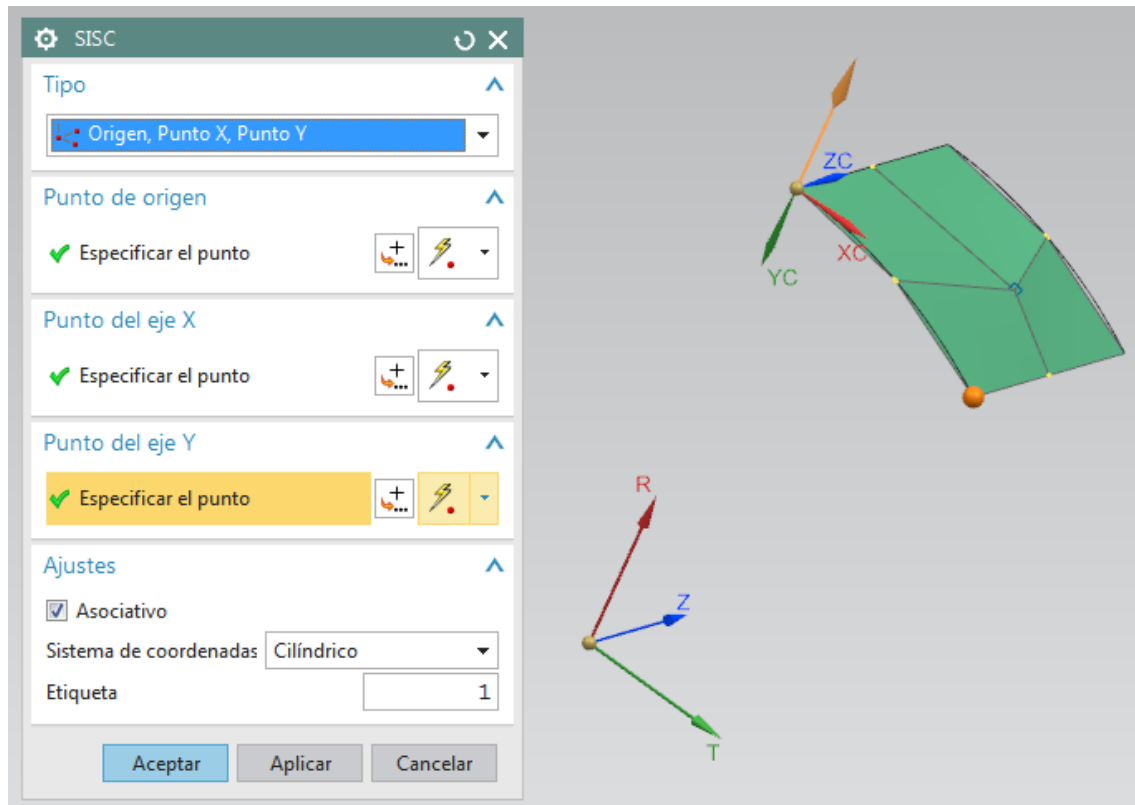


Ilustración AIII - 2.13: Creación SISC cilíndrico.

Como puede observarse, el tipo es [Origen, Punto X, Punto Y], asimismo, el origen corresponde con el centro de la curva presente y como puntos X e Y se han tomado los dos extremos de esta. Una vez completado el cuadro, aceptar, completando así el archivo de mallado. Es recomendable guardar antes de continuar. Seguidamente, debe activarse al módulo de simulación, haciendo clic en el icono que indica [Activar la simulación].

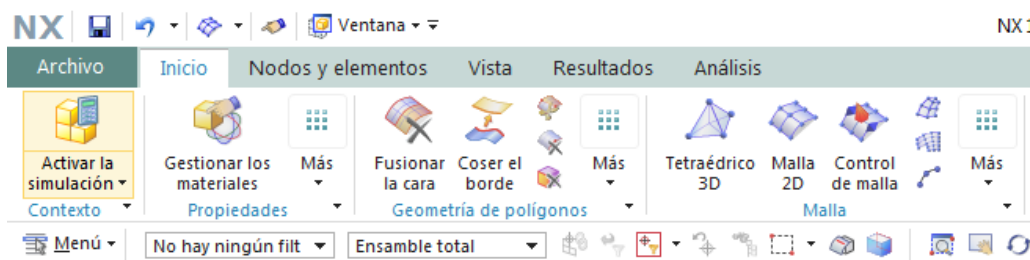
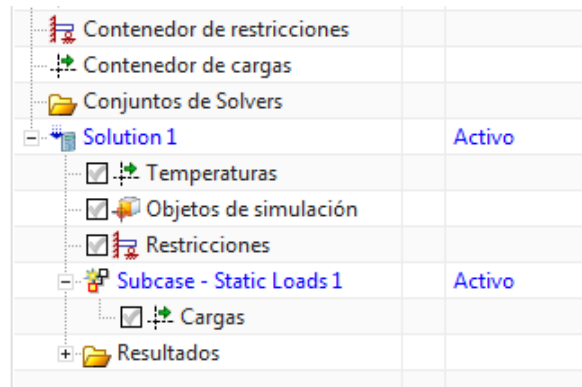


Ilustración AIII - 2.14: Menú Inicio, Activar la simulación.

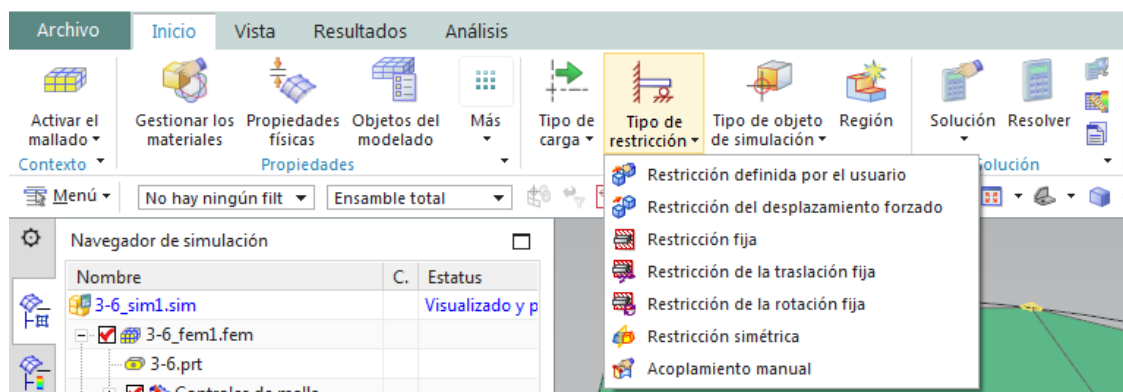
Una vez activada la simulación, se puede observar cómo cambian los menús y aparece activa la solución en el navegador, en este caso llamado [Solution 1] (el nombre puede ser cambiado fácilmente de nombre haciendo clic en el botón derecho).



**Ilustración AIII - 2.15: Vista del navegador con solución activa.**

Siemens NX ofrece aquí una muy interesante funcionalidad, permite la creación y simulación de casos independientes de un mismo mallado. Así pues, se diferencian los contenedores de restricciones y cargas de las restricciones y cargas aplicadas en cada solución. Asimismo, cabe destacar que con unas mismas restricciones pueden plantearse multitud de subcasos con diferentes cargas. Esta funcionalidad es muy útil para el problema que se ocupa, puesto que deben estudiarse los resultados de dos subcasos de carga diferentes, eso sí, siempre con las mismas restricciones.

Una vez activada la simulación, se procede a imponer las restricciones, estas se encuentran en el desplegable [Tipos de restricción], dentro del grupo [Cargas y condiciones], en la pestaña de [Inicio]. En este caso se requiere una [Restricción fija] para el borde AB y condiciones de simetría para las aristas AD y BC.

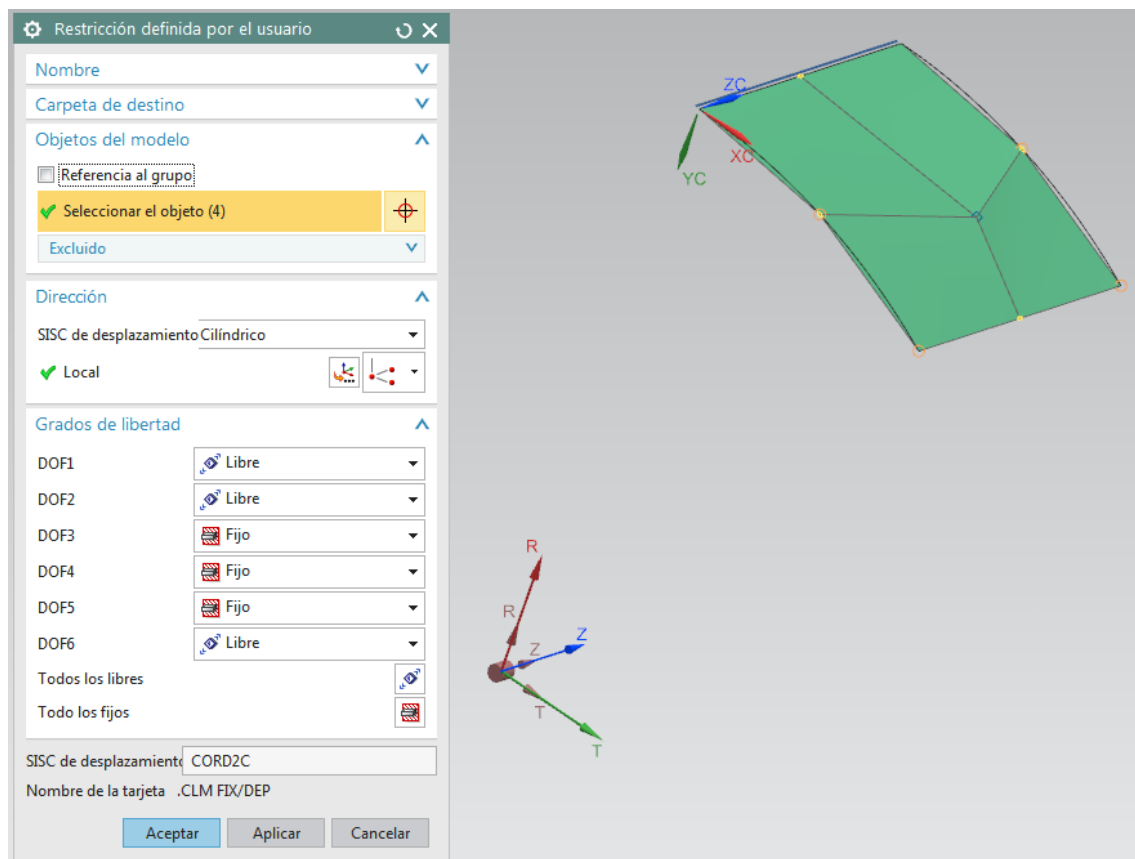


**Ilustración AIII - 2.16: Añadir restricción.**

La restricción fija es sencilla de implementar, solo debe seleccionarse el elemento, nodo, arista, superficie o cuerpo a fijar. Cabe remarcar que las restricciones y cargas que se vayan definiendo irán aplicándose a la solución y el subcaso activo, ergo apareciendo también en los respectivos contenedores.

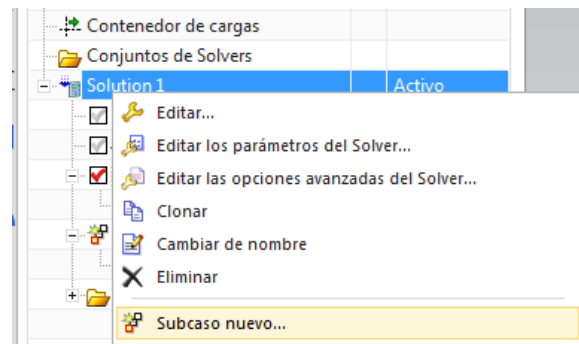
La condición de simetría, en cambio, es más compleja de aplicar. Existe la opción de [Restricción simétrica], pero es solo aplicable en superficies, en este caso, lo que se pretende es aplicar la condición de simetría a dos aristas respecto al plano perpendicular al eje del cilindro (plano RT). Para ello deberán ser introducidos los grados de libertad manualmente. Así pues, se procede a aplicar una [Restricción definida por el usuario].

En la ventana emergente que aparece se deben fijar los grados DOF3, DOF4 y DOF5, que corresponden al desplazamiento en dirección Z, y los momentos en dirección R y T respectivamente. Asimismo, en el desplegable de [Dirección], se elige SISC [Cilíndrico] y se selecciona el sistema cilíndrico creado en el archivo de mallado. Por tal de no generar incompatibilidad con la restricción fija anteriormente aplicada, los cuerpos a restringir deben ser todos los nodos de las curvas AD y BC excepto los nodos correspondientes a los extremos A y B (los cuales han sido fijados anteriormente).



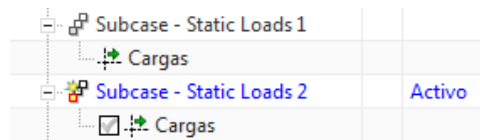
**Ilustración AIII - 2.17: Aplicación de Restricción definida por el usuario.**

Seguidamente, una vez condicionadas todas las restricciones, se procede a aplicar las cargas. Como se ha comentado anteriormente, este problema abarca dos subcasos, por lo que deben crearse dichos subcasos en la simulación. Para ello, hacer clic en el botón derecho encima de la única solución creada: [Solution 1]. En el desplegable aparece la opción [Subcaso nuevo...].



**Ilustración AIII - 2.18: Creación subcaso nuevo.**

El nuevo subcaso se creará por defecto con las mismas características que el ya existente y aparecerá como activo. En el caso que se ocupa se ha nombrado [Subcase – Static loads 2]. Para pasar de un subcaso al otro simplemente hacer doble clic sobre el que se desea trabajar.



**Ilustración AIII - 2.19: Vista navegador con subcaso activado.**

Así pues, ahora puede procederse a aplicar la carga en el primer subcaso. Ésta debe ser un momento en la dirección longitudinal del cilindro (eje Z), aplicada sobre la arista CD. Para ello, se selecciona la opción [Tipo de carga] y seguidamente [Momento]. En el cuadro de diálogo que aparece hay que introducir el valor del momento, en este caso 1kNm/m. Dado que no puede introducirse un momento distribuido uniformemente directamente, hay que realizar el siguiente cálculo, teniendo en cuenta que la arista mide 0,5 metros:

$$\frac{1 \text{ kNm}}{\text{m}} \cdot 0,5 \text{ m} = 500 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, el cuadro de dialogo se completa con un momento de 500Nm aplicado sobre la arista CD, en dirección al eje Z. Como puede observarse en la *il. 2.20*, el tipo de momento aplicado debe ser [Magnitud y dirección]. Asimismo, es importante remarcar que el método de distribución debe ser [Distribución genérica]. Este tipo de distribución reparte el total de la carga de manera uniforme en función de las dimensiones de cada elemento.

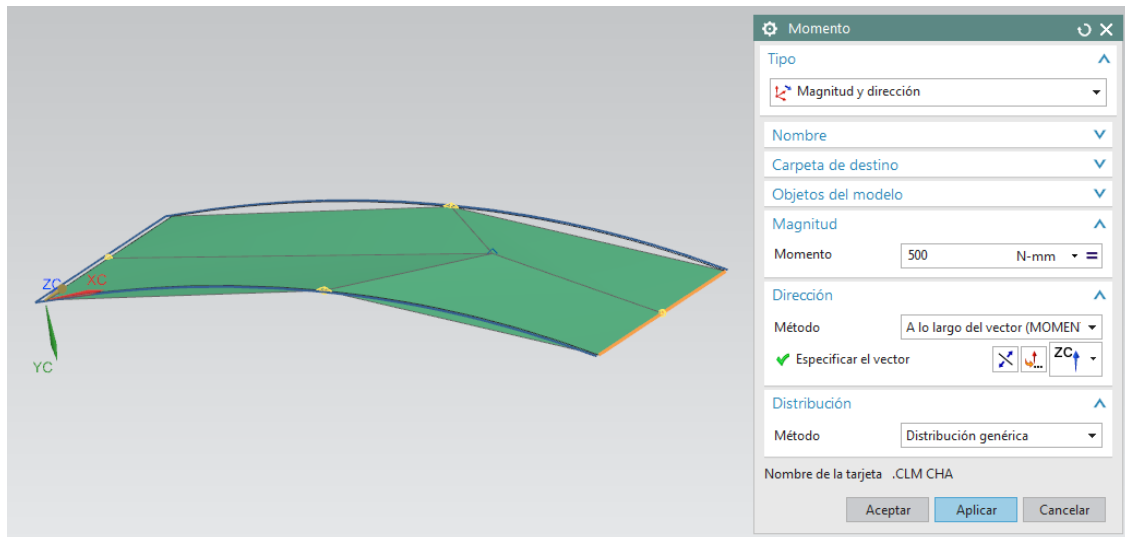


Ilustración AIII - 2.20: Aplicación de momento.

Una vez aplicado el momento, puede procederse a aplicar las cargas del segundo subcaso. Cabe recordar que para activarlo simplemente hay que hacer doble clic sobre [Subcase – Static loads 2], en el navegador de simulación. Una vez activado, se procede a aplicar la presión normal a la superficie, para ello hay que seleccionar la opción [Presión] en el desplegable de [Tipos de carga]. El tipo de presión seleccionado debe ser [Presión normal en los elementos 2D]. A continuación completar el cuadro de diálogo seleccionando la superficie e introduciendo un valor de -0,6MPa, el signo negativo indica que la presión debe ser hacia afuera, partiendo de la superficie.

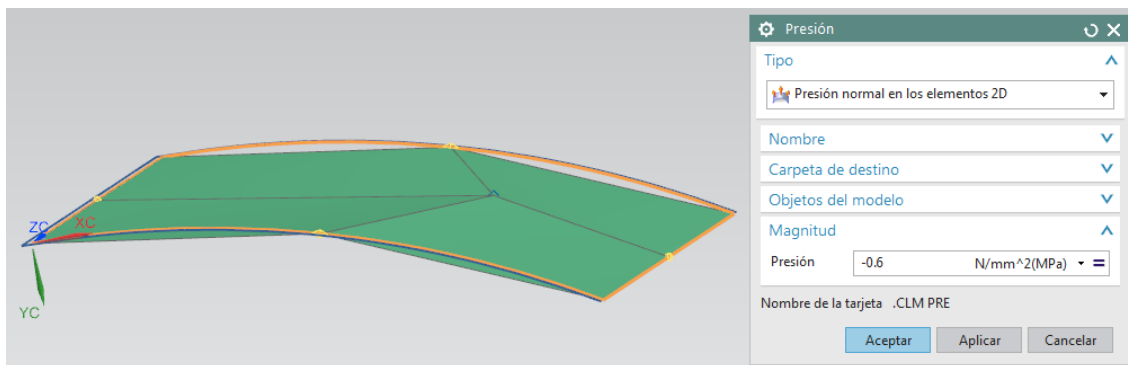
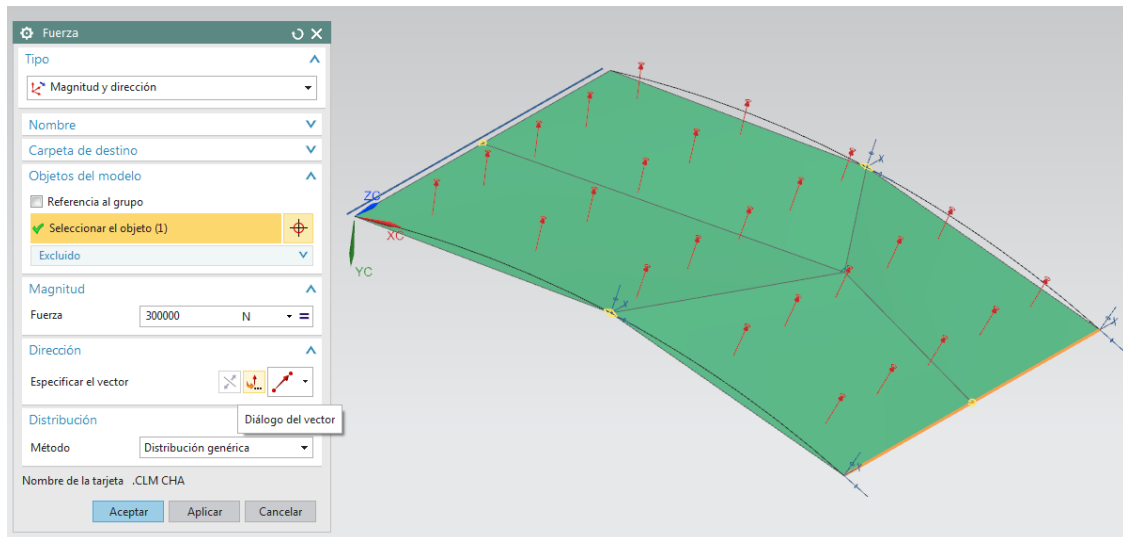


Ilustración AIII - 2.21: Aplicación de presión.

Seguidamente, después de aceptar el cuadro de dialogo de la presión, hay que aplicar la presión tangencial hacia afuera en superficie de la arista CD, con un valor indicado en el enunciado de  $60 \text{ N/mm}^2$ . Puesto que esta superficie no existe como tal, sino que está representada en el grosor de un elemento plano, hay que realizar una conversión a fuerza teniendo en cuenta el espesor (0,01m) y la longitud de la arista CD (0,5m):

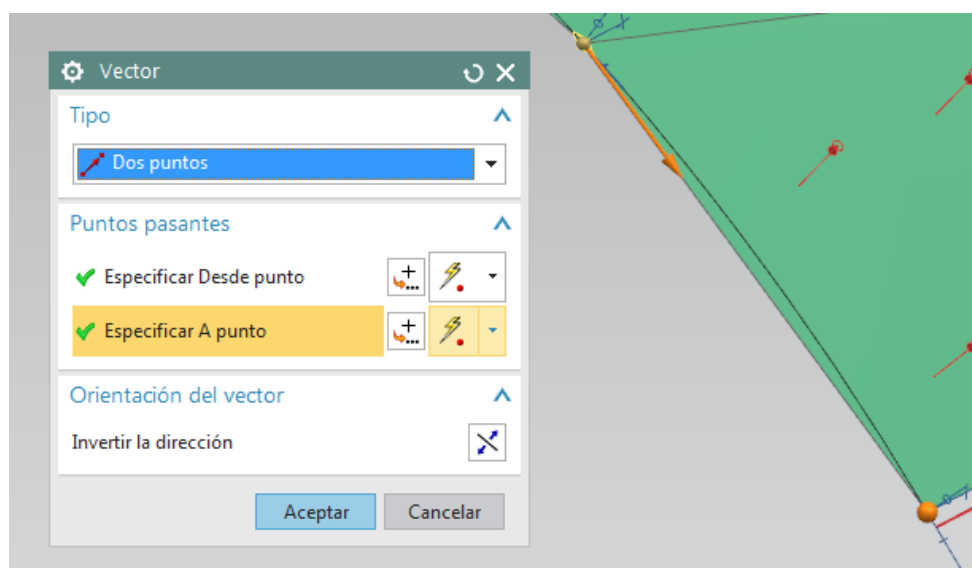
$$60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,01 \cdot 10^3 \text{ mm} \cdot 0,5 \cdot 10^3 \text{ mm} = 300.000 \text{ N}$$

Asimismo, tal y como se expone en el enunciado, al aproximar la curva mediante elementos lineales, se genera una diferencia de direcciones entre la tangente de la curva y la tangente del elemento. Tal y como expone el enunciado, se debe aplicar la fuerza en direcci3n tangente al elemento. Por tal de aplicar la direcci3n correcta, en la ventana emergente [Fuerza] hacer clic en la opci3n [Diálogo del vector] (il. 2.22).



Ilustraci3n AIII - 2.22: Aplicaci3n de la fuerza.

Una vez seleccionada esta opci3n, aparece otra ventana emergente para configurar el vector director de la fuerza. En él, seleccionar el tipo [Dos puntos] y seguidamente especificar los dos nodos que generan la direcci3n tangente. Seguidamente aceptar el cuadro [Vector] y a continuaci3n aceptar tambi3n el cuadro [Fuerza] para completar la aplicaci3n de la fuerza tangente.



Ilustraci3n AIII - 2.23: Determinar direcci3n de la fuerza.

### AIII - 3. Cálculo

Una vez aplicadas todas las condiciones de contorno, el archivo de simulación se haya completado, por este motivo, es recomendable guardar antes de continuar con la solución y el post procesado. Seguidamente, se debe resolver el problema, seleccionando la opción [Resolver] en la pestaña de [Inicio], grupo [Solución].

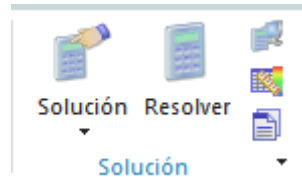


Ilustración AIII - 3.1: Grupo Solución.

Cuando se selecciona dicha opción aparece una ventana emergente que hay que aceptar y empieza el proceso de resolución. Una vez completado, y si no hay ningún error, deben aparecer las siguientes ventanas y mensajes:

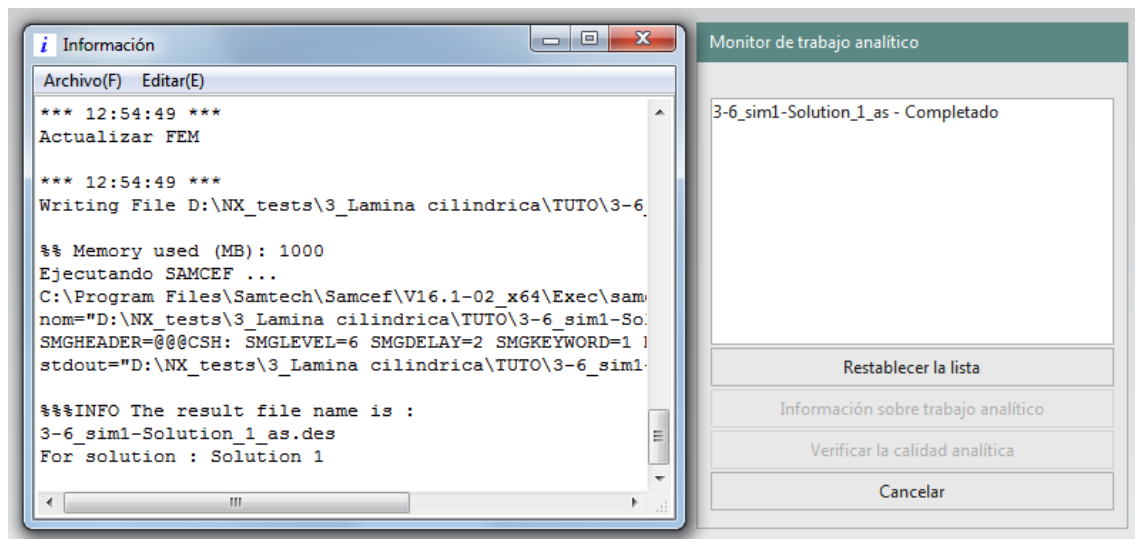


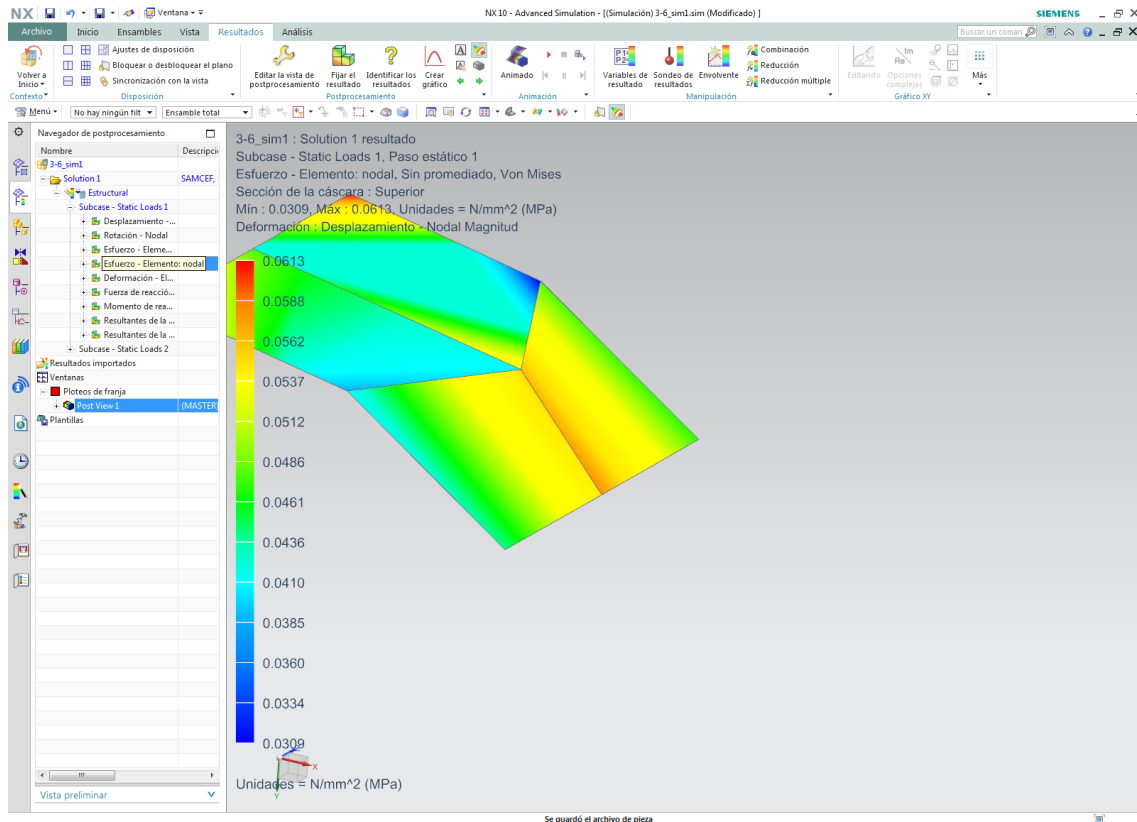
Ilustración AIII - 3.2: Solución completada.

Dichas ventanas pueden ser cerradas, a continuación, se entra en la etapa de post procesado seleccionando la pestaña de [Navegador de postprocesamiento], justo debajo de la pestaña del [Navegador de simulación]. En ella, debe hacerse doble clic sobre [Estructural] para cargar la solución.



## AIII - 4. Post-procesado

Una vez cargada la soluci3n en la vista de post-procesado, se puede seleccionar cualquiera de los posibles *outputs*, en el presente tutorial se selecciona [Esfuerzo – Elemento: nodal] del primer sub-caso. Para seleccionar hacer doble clic en el *output*, o bien bot3n derecho y [Aplicar].



**Ilustraci3n AIII - 4.1: Aplicaci3n del output deseado.**

Seguidamente, por tal de visualizar los resultados especificados, hay que cambiar a sistema de coordenadas cilíndrico y seleccionar la direcci3n tangente (TT). Para ello, hacer clic en la opci3n [Fijar el resultado], en el grupo [Postprocesado], en la pestaña [Resultados]. Se abrirá automáticamente una ventana emergente (*il. 4.2*) en la que deberemos seleccionar la direcci3n [TT], habilitar la opci3n de [Promediado], y en [Sistema de coordenadas], seleccionar [Cilíndrico seleccionado]. Dado que se ha seleccionado esta opci3n, debe marcarse el sistema de coordenadas en [Navegador de simulaci3n]. Una vez seleccionado, se puede aceptar la ventana [Ploteo suave].

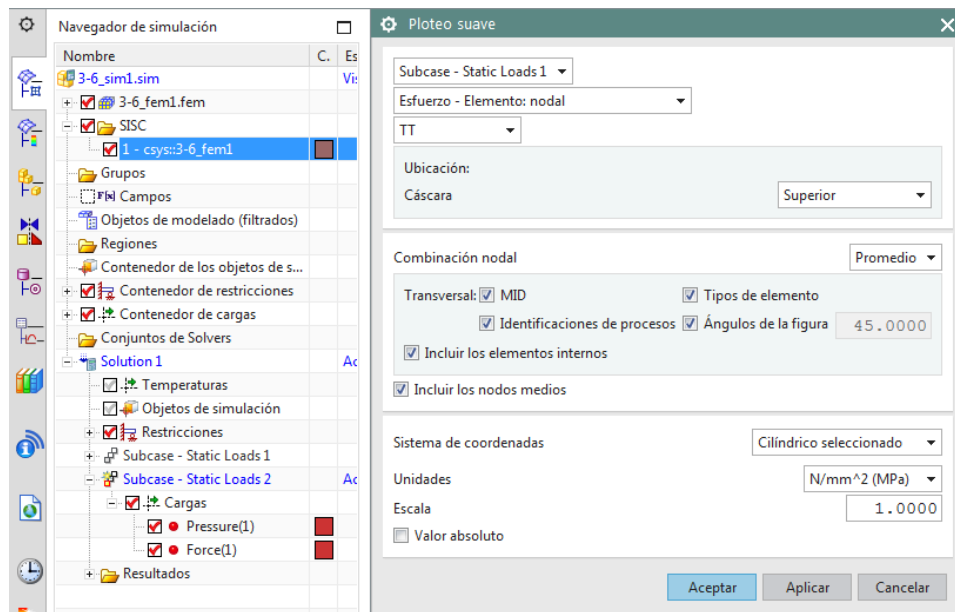


Ilustración AIII - 4.2: Ploteo suave.

Realizados estos cambios, se puede ya observar en pantalla el ploteo deseado, pero no todavía el valor concreto de tensión en el punto E. Para visualizarlo, seleccionar la opción [Anotación nueva], en el grupo [Postprocesado], en la pestaña [Resultados]. Al seleccionarla, aparece una ventana emergente titulada [Anotación]. Seleccionar el nodo que se encuentra en la posición del punto E y aceptar para visualizar el resultado en forma de etiqueta.

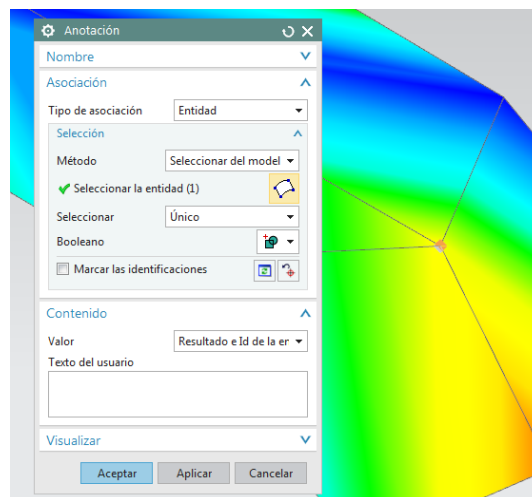


Ilustración AIII - 4.3: Anotación nueva.

De este modo puede visualizarse ya el valor requerido. Aun así, NX ofrece muchísimas opciones de post-procesado, tales como varias vistas sincronizadas o variaciones en la disposición del ploteo. Dado que no es objetivo principal de este tutorial, el uso de estas opciones no se expone en el presente documento.

### III. Bibliografía de referencia

- CASANOVA, J. y AGUIRRE, V., 2005. Banco de pruebas para medida de fricción en pistones. *Revista iberoamericana de ingeniería mecánica* [en línea], vol. 9, pp. 79-94. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2218588&orden=320006&info=link>.
- CATERPILLAR, 2012. Bielas: Funciones y Fabricación. [en línea]. [Consulta: 24 febrero 2016]. Disponible en: <http://datoscaterpillar.blogspot.com.es/2012/11/bielas-funciones-y-fabricacion-la.html>.
- COMAS, A., 2010. *El motor térmico alternativo*. Terrassa: s.n.
- CORALLO, A., VASSALLO, T. y DALL'ORTO, H., 2003. Capítulo 13: Pérdidas y fricciones. , pp. 1-44.
- KATES, E.J. y LUCK, W.E., 1981. *Motores Diesel Y De Gas De Alta Compresión*. S.l.: s.n.
- NAFEMS, 1986a. NAFEMS Benchmark LE1. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS\\_benchmarks/le1.html](http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le1.html).
- NAFEMS, 1986b. NAFEMS Benchmark LE2. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS\\_benchmarks/le2.html](http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le2.html).
- NAFEMS, 1986c. NAFEMS Benchmark LE3. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS\\_benchmarks/le3.html](http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le3.html).
- NAFEMS, 1986d. NAFEMS Benchmark LE5. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS\\_benchmarks/le5.html](http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le5.html).
- NAFEMS, 1989. NAFEMS Benchmark LE6. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS\\_benchmarks/le6.html](http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le6.html).
- NAFEMS, 1990. NAFEMS Benchmark LE10. [en línea]. [Consulta: 27 mayo 2016]. Disponible en: [http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS\\_benchmarks/le10.html](http://www.caesarsystems.co.uk/NAFEMS_benchmarks/le10.html).
- SIEMENS, 2015. Siemens PLM Software brochure. ,
- ZHOU, Q., WANG, Y. y JI, W., 2010. The Finite Element Analysis of Connecting Rod of Diesel Engine. *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* [en línea], no. 2, pp. 870-873. DOI 10.1109/ICMTMA.2010.543. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5459521>.